

Stefan Schröter

Entwicklung eines handgehaltenen akustischen
Kamerasystems

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida 2009

Stefan Schröter

Entwicklung eines handgehaltenen akustischen Kamerasystems

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mathematik / Physik / Informatik

Mittweida 2009

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Christian Schulze

vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 08.05.2009

Bibliographische Beschreibung

Schröter, Stefan

Entwicklung eines handgehaltenen akustischen Kamerasystems – 2009. – S. 66

Dresden, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Mathematik / Physik / Informatik,
Diplomarbeit, 2009

Referat

Ziel dieser Diplomarbeit ist die elektronische und konstruktive Entwicklung eines handgehaltenen akustischen Kamerasystems.

In Fahrzeuginnenräumen stellen Knarz- und Rüttelgeräusche eine spezielle Problematik dar. Die Lokalisierung dieser Schallquellen ist mit gebräuchlichen, stationär positionierten akustischen Kamerasystemen auf Grund ihrer räumlichen Ausdehnung nur unzureichend möglich. Zudem ist ihre zuverlässige Funktionsweise in Folge ihrer akustischen Durchsichtigkeit im diffusen Schallfeld nicht gewährleistet. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll daher ein handgehaltenes akustisches Kamerasystem entwickelt werden, das den flexiblen Einsatz in Fahrzeuginnenräumen erlaubt.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein geeignetes stromgespeistes Elektretmikrofon ausgelegt. Für die Wahl der Mikrofonkapsel werden definierte Kriterien wie Frequenzgang, Klirrfaktor und Eigenrauschen messtechnisch erfasst und mit kommerziellen Mikrofonen verglichen. Im zweiten Teil der Arbeit steht die auf dem Grenzflächenprinzip basierende mechanische Konstruktion im Vordergrund. Hierzu soll unter anderem ein Kameraadapter entworfen werden, der die Aufnahme der optischen Kamera des bestehenden akustischen Kamerasystems AcoustiCam[®] ermöglicht. Anschließend erfolgt die Erprobung unter praxisnahen Bedingungen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Formelverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Akustische Kamera / Beamforming	2
3 Elektronische Konstruktion	10
3.1 Elektromechanischer Wandler.....	10
3.2 IEPE-Konditionierung	19
3.2.1 IEPE-Prinzip.....	19
3.2.2 Einfluss des R_V auf die Eigenschaften der Elektretkapsel	25
3.3 Gegenüberstellung der Mikrofonkapseln	34
4 Mechanische Konstruktion des Arrays	42
4.1 Eigenschaften des Grenzflächenarrays	42
4.2 Auslegung der Array-Konstruktion.....	44
5 Messtechnische Untersuchungen	51
5.1 Messaufbau.....	51
5.2 Messergebnisse	54
6 Zusammenfassung und Ausblick	63
7 Literaturverzeichnis	65
Anhang	i
Anhang A: Datenblätter der verwendeten Elektretmikrofon-Kapseln	i
Anhang B: Resonanzfrequenz und technische Zeichnung der Druckkammer	v
Anhang C: Bestimmung des Klirrfaktors und des maximalen Schalldruckpegels	vii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Funktionsprinzip eines Arrays mit \vec{k}_f , dem Vektor der Fokusrichtung des Beamformers und \vec{k} , dem Wellenvektor einer aus dem Fernfeld einfallenden ebenen Welle [3].....	3
Abbildung 2.2:	Eine ebene Schallwelle mit dem Wellenzahlvektor \vec{k}_0 erreicht das Array aus einer von der Fokusrichtung \vec{k}_f abweichenden Richtung; mit \vec{K} gleich der Differenz von \vec{k} und \vec{k}_0 , den in die Arrayebene projizierten Wellenzahlvektoren von \vec{k} und \vec{k}_0 [3]	4
Abbildung 2.3:	Antwortfunktion eines Linienarrays	5
Abbildung 2.4:	Darstellung des Rayleigh-Kriteriums zur Trennung zweier Quellen; mit dem Array-Pattern zweier mit \vec{k}_1 und \vec{k}_2 einfallenden Schallwellen und dem resultierenden Ausgangssignal des Beamformers [3]	7
Abbildung 2.5:	Verhalten eines Linienarrays bei Erhöhen der Sendefrequenz (konstante Geometrie) [15]	7
Abbildung 2.6:	Verhalten eines Linienarrays bei Veränderung der Aperturlänge (konstante Sendefrequenz) [15].....	7
Abbildung 2.7:	Auflösevermögen eines Arrays im Nahfeld für auf der Arraynormalen befindliche Quellen [3], [15]	8
Abbildung 2.8:	Definition der Hauptkeulenbreite (HKB) und des Signal-Rausch-Abstands (SNR) eines Array-Patterns	9
Abbildung 3.1:	Schematischer Aufbau einer Kondensatormikrofon-Kapsel (Druckempfänger) [13].....	11
Abbildung 3.2:	Richtcharakteristik von Druck- und Druckgradientenempfängern [7].....	11
Abbildung 3.3:	Prinzip des Kondensatormikrofons [23].....	12
Abbildung 3.4:	Theoretischer Frequenzgang eines Kondensatormikrofons	14
Abbildung 3.5:	Lebensdauer von Elektreten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen [31].....	16
Abbildung 3.6:	Schematischer Aufbau des Back-Elektretmikrofons.....	17
Abbildung 3.7:	Schaltungsschema des Impedanzwandlers (JFET) einer Elektretmikrofon-Kapsel [13].....	18
Abbildung 3.8:	Schematischer Aufbau eines JFET [29]	19
Abbildung 3.9:	IEPE-Prinzip [27]	20
Abbildung 3.10:	Aussteuerungsgrenzen eines IEPE-Sensors [27]	21
Abbildung 3.11:	Betriebsspannungsversorgung einer Elektretmikrofon-Kapsel	21

Abbildung 3.12: IEPE-Konstantstromversorgung einer Elektretmikrofon-Kapsel	22
Abbildung 3.13: Zusammenhang zwischen Kapselwiderstand R_K und Gesamtwiderstand R_{GES} mit $R_V = \text{const} = 2,2 \text{ k}\Omega$	23
Abbildung 3.14: Nahezu linearer Zusammenhang zwischen Kapselwiderstand R_K und Gesamtwiderstand R_{GES} bei kleiner ΔR_K und $R_V = \text{const} = 2,2 \text{ k}\Omega$	23
Abbildung 3.15: Druckkammer mit BSWA-Tech MPA416, Microtech Gefell M360 Nr. 1881 (Referenz) und Kopfhörer	27
Abbildung 3.16: Einfluss von R_V auf den Frequenzgang der Elektretmikrofon-Kapsel K2 ...	27
Abbildung 3.17: Einfluss von nichtlinearen Verzerrungen auf das FFT-Spektrum	28
Abbildung 3.18: Darstellung ermittelter Klirrfaktoren und der zugehörigen Regressionsfunktion der EMK K2	30
Abbildung 3.19: Einfluss von R_V auf den Klirrfaktor der EMK K2	31
Abbildung 3.20: Einfluss von R_V auf den äquivalenten Schalldruckpegel $L_{p,Rausch}$ der EMK K2	33
Abbildung 3.21: Einfluss von R_V auf das Übertragungsverhalten bei 10 m Kabellänge.....	33
Abbildung 3.22: Einfluss von R_V auf das Übertragungsverhalten bei 20 m Kabellänge.....	34
Abbildung 3.23: Abbildung der untersuchten EMK	35
Abbildung 3.24: Frequenzgang der einzelnen Mikrofonkapseln.....	37
Abbildung 3.25: Frequenzgang Microtech Gefell M360 Nr. 0440 und BSWA-Tech MPA416.....	37
Abbildung 3.26: A-bewertetes Terzspektrum des äquivalenten Schalldruckpegels für K1 bis K4, sowie der Mikrofone Microtech Gefell M360 und BSWA-Tech MPA416.....	39
Abbildung 3.27: A-bewerteter Summenpegel des äquivalenten Schalldruckpegels	40
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der veränderten rückwärtigen Richtcharakteristik eines Linienarrays bei tiefen Frequenzen und mit endlicher Grenzfläche (quantitativ)	43
Abbildung 4.2: Auswirkung des Druckstaueffekts auf den Frequenzgang eines Grenzflächenmikrofons [7]	44
Abbildung 4.3: Frontplatte	45
Abbildung 4.4: Front- und Rückplatte	46
Abbildung 4.5: Front- und Rückansicht des Grenzflächenarrays	47
Abbildung 4.6: Kameraadapter	48
Abbildung 4.7: Handgehaltenes Array	49
Abbildung 4.8: Stativhalterung des Arrays	49
Abbildung 5.1: Messaufbau zur Prüfung des Verhaltens bei rückwärtigem Schalleinfall...	52
Abbildung 5.2: Messaufbau im Kfz	52

Abbildung 5.3:	Messobjekt (Fahrzeugschlüssel).....	53
Abbildung 5.4:	Schematischer Aufbau des Messsystems AcoustiCam®	54
Abbildung 5.5:	Korrekturfaktoren der einzelnen Kanäle bei Absolutkalibrierung und Relativkalibrierung	55
Abbildung 5.6:	Pegeldifferenz für Mikrofone des Außen- und Innenkreises, sowie der Mittelwert für das gesamte Array in Folge des Druckstaueffektes	56
Abbildung 5.7:	Luftdruckdüse ohne Störquelle (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB).....	57
Abbildung 5.8:	Luftdruckdüse mit Störquelle SQ1 (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB).....	57
Abbildung 5.9:	Störquelle SQ1, $L_{p,SQ1} = 84$ dB SPL (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB).....	58
Abbildung 5.10:	Luftdruckdüse mit Störquelle SQ2 (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB).....	58
Abbildung 5.11:	Störquelle SQ2, $L_{p,SQ2} = 89$ dB SPL (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB).....	58
Abbildung 5.12:	Ergebnis der Lokalisierung eines Schlüsselklapperns in einem geschlossenen Fahrzeuginnenraum bei laufendem Motor und laufender Lüftung (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)	60
Abbildung 5.13:	Ergebnis der Lokalisierung eines Schlüsselklapperns in einem geschlossenen Fahrzeuginnenraum bei laufendem Motor und laufender Lüftung sowie aktiver Störquelle (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB).....	60
Abbildung 5.14:	Terzpegel für ein Mikrofon im Grenzflächenarray ($L_{p,Summe} = 84,2$ dB, $L_{p,Summe,SQ} = 86,9$ dB)	60
Abbildung 5.15:	Zeit-Schalldruck-Signal des Schlüsselklapperns.....	61
Abbildung 5.16:	Einzelbild bei synchronem Start von Schlagimpuls und Schalldruckerfassung der Echtzeitanalyse (Zeitfensterlänge 21,3 ms, Oktavband 8 kHz, Dynamikbereich 6 dB)	62
Abbildung 5.17:	Einzelbild bei zufällig gewähltem Startzeitpunkt der Quasiechtzeitanalyse (Zeitfensterlänge 21,3 ms, Oktavband 8 kHz, Dynamikbereich 6dB)	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Arbeitspunktspannung U_K in Abhängigkeit vom Vorwiderstand R_V und resultierendem Gesamtwiderstand R_{GES}	24
Tabelle 3.2:	Empfindlichkeiten S der Elektretmikrofon-Kapsel K2 in Abhängigkeit von R_V	26
Tabelle 3.3:	Einfluss von R_V auf den maximalen Schalldruckpegel	31
Tabelle 3.4:	Übersicht der untersuchten Elektretmikrofon-Kapseln	35
Tabelle 3.5:	Ergebnis der Empfindlichkeitsbestimmung der Mikrofonkapseln.....	36
Tabelle 3.6:	Übersicht maximaler Schalldruckpegel bei $k=1\%$ und $k=3\%$	38
Tabelle 3.7:	Ergebnisse der SNR-Bestimmung	40
Tabelle 3.8:	Vergleich der Mikrofonkapseln.....	41

Formelverzeichnis

Zeichen	Erläuterung	Einheit
$b(\theta, t)$	Ausgangssignal des Beamformers im Zeitbereich	Pa
$B(\theta, \omega), B(\vec{k}_f, \omega)$	Ausgangssignal des Beamformers im Frequenzbereich	Pa
c_0	Schallgeschwindigkeit (342 m/s)	m/s
C	Kapazität	F
C_0	Ruhekapazität	F
C_K	Koppelkondensator	F
d	Plattenabstand	m
d	Durchmesser Grenzfläche	m
d_{min}	kleinster Mikrofonabstand eines Mikrofonarrays	m
D	Apertur	m
EMK	Elektretmikrofon-Kapsel	-
f	Frequenz	Hz
f_g	Grenzfrequenz (Druckstauereffekt)	Hz
F	mechanische Kraft	N
\underline{G}_{up}	Übertragungsfaktor eines Mikrofons	mV/Pa
$G_{up,0}$	Übertragungsfaktor eines Mikrofons über den linearen Frequenzbereich	mV/Pa
HKB	Hauptkeulenbreite	-
$ H(f) $	Frequenzgang	dB
I_{const}	Strom der Konstantstromquelle	A
j	imaginäre Einheit	-
\vec{k}_f	Richtungsvektor der Array-Fokusrichtung	-
\vec{k}	Wellenzahlvektor	m ⁻¹
k	Klirrfaktor	%
k	Wellenzahl	m ⁻¹
\vec{K}	Wellenzahlvektordifferenz in der Arrayebene	m ⁻¹
K	Wellenzahl der Wellenzahlvektordifferenz eines Linienarrays	m ⁻¹
L_p	Schalldruckpegel	dB
$L_{p,K}$	Kalibrierschalldruckpegel	dB

$L_{p,Rausch}$	äquivalenter Schalldruckpegel	dB, dB(A)
m	Masse	kg
m''	flächenbezogene Masse	kg/m ²
m_K	Masse der Luft in der Druckausgleichskapillare	kg
M	Mikrofonanzahl eines Arrays	-
p	Schallwechseldruck	Pa
P	Schallwechseldruck im Frequenzbereich	Pa
p_0	Bezugsschalldruck ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa)	Pa
p_K	Kalibrierschalldruck (1 Pa)	Pa
Q	elektrische Ladung	C
Q_0	elektrische Ruheladung	C
R	ohmscher Widerstand	Ω
R	Auflösung	m
R_{GES}	Gesamtwiderstand aus R_K und R_V	Ω
R_K	ohmscher Widerstand der Mikrofonkapsel	Ω
R_L	Ladewiderstand	Ω
R_V	parallel der EMK vorgeschalteter Widerstand	Ω
\vec{r}_m	Vektor vom Arraymittelpunkt zum m-ten Mikrofon	-
s	Federsteife	kg/s ²
s_E	Federsteife der eingespannten Membran	kg/s ²
s_L	Federsteife des eingeschlossenen Luftvolumens	kg/s ²
S	Empfindlichkeit	mV/Pa, dB rel. 1V/Pa
S_M	Querschnittsfläche der Mikrofonmembran	m ²
SNR	Signal-Rausch-Abstand (engl. signal-to-noise ratio)	dB
S_Q	Querschnittsfläche der Druckausgleichskapillare	m ²
u	elektrische Spannung (Wechselstromgröße)	V
u_{Rausch}	Rauschspannung	V
u_S	um die Arbeitspunktspannung der EMK oszillierende Signalspannung	V
U	elektrische Spannung (Gleichstromgröße)	V
U_0	elektrische Polarisationsspannung des Kondensators	V
U_B	elektrische Betriebsspannung zur Versorgung des Im- pedanzwandlers einer Elektretmikrofon-Kapsel	V
U_C	elektrische Kondensatorspannung	V
U_K	elektrische Arbeitspunktspannung der EMK	V
U_S	elektrische Ausgangsspannung am Kondensator	V

w_m	Wichtungsfaktor	-
x	Auslenkung der Platten eines Plattenkondensators	m
x	Auslenkung des Resonators	m
$\underline{W}(\vec{K})$	Array-Pattern	-
z	Abstand von Arrayebene zur Abtastebene	m
θ	Winkel der Fokusrichtung eines Arrays	°
λ	Wellenlänge	m
τ_m	Laufzeitkorrektur	s
ω	Kreisfrequenz	Hz
ω_1	elektronisch bedingte Knickfrequenz (Frequenzgang)	Hz
ω_1'	mechanisch bedingte Knickfrequenz (Frequenzgang)	Hz

Kennzeichnung von Größen

\underline{a}	komplexe Größe a
\vec{a}	vektorielle Größe a
$ a $	Betrag von a

1 Einleitung

Eine effektive Lärminderung erfordert in jedem Frequenzband eine genaue Kenntnis der jeweils dominierenden Schallquelle. Die Anwendung eines akustischen Kamerasystems ermöglicht es, diese Informationen in kurzer Zeit und mit geringem Messaufwand zu gewinnen. In Fahrzeuginnenräumen stellen hierbei die sogenannten Knarz- und Rüttelgeräusche eine spezielle Problematik dar. Gebräuchliche, stationär positionierte akustische Kamerasysteme erweisen sich durch ihre räumliche Ausdehnung für Untersuchungen im Innenraum von Fahrzeugen als ungeeignet. Zudem ist ihre zuverlässige Funktionsweise auf Grund ihrer akustischen Durchsichtigkeit im diffusen Schallfeld nicht gewährleistet. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll daher ein handgehaltenes akustisches Kamerasystem entworfen werden, welches zur flexiblen Quelllokalisierung im Fahrzeuginnenraum eingesetzt werden kann.

Die Diplomarbeit gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil der Arbeit ist ein für die Anwendung im Messsystem geeignetes stromgespeistes Elektretmikrofon auszulegen. Den Schwerpunkt hierbei stellt die Auswahl der geeigneten Elektretkapseln dar. Dabei werden definierte Kriterien wie Frequenzgang, Klirrfaktor sowie Eigenrauschen verschiedener Mikrofonkapseln messtechnisch erfasst und mit kommerziellen Mikrofonen verglichen. Im Mittelpunkt des zweiten Teils steht die mechanische Konstruktion eines handgehaltenen akustischen Kamerasystems. Für den Einsatz im diffusen Schallfeld wird auf das Prinzip des Grenzflächenarrays zurückgegriffen. Zur simultanen Überlagerung der akustischen Messung mit einer Fotografie des Messobjektes wird die bereits bestehende optische Kamera des AcoustiCam[®]-Messsystems angeschlossen. Anschließend wird das entwickelte Kamerasystem in einem Fahrzeuginnenraum auf seine Funktionsweise erprobt.

2 Akustische Kamera / Beamforming

Als akustische Kamera wird ein Messsystem bezeichnet, das eine gemeinsame Erfassung und Verarbeitung von Schall- und Bildinformationen, mit dem Ziel der Schallquellenlokalisierung, ermöglicht. Anwendungsgebiet eines solchen Systems ist die genaue Lokalisierung von Schallquellen um zum Beispiel mittels konstruktiven Maßnahmen Lärminderungen an Automobilen, Eisenbahnen und Flugzeugen sowie an technischen Gebrauchsgegenständen zu realisieren. Die messtechnische Erfassung der Schallinformationen erfolgt über ein Mikrofonarray. In diesem sind eine Vielzahl von Mikrofonen zusammengeschaltet. Grundlegendes Prinzip der Schallquellenortung und Bestimmung ihrer Stärke ist die Auswertung der Laufzeit- und Schalldruckpegelunterschiede, die dabei zwischen den einzelnen räumlich verteilten Mikrofonen auftreten.

Unter dem Begriff Beamforming versteht man einen räumlichen Filter, der einem Sensorarray nachgeschaltet wird und durch gezielte Laufzeitkorrektur der Sensorsignale eine gezielte Ausrichtung des Arrays erreicht. Seine Funktionsweise kann mit der eines akustischen Hohlspiegels verglichen werden [30]. Ein Vorteil bei der Verwendung eines Arrays gegenüber dem akustischen Hohlspiegel besteht durch das Entfallen der mechanischen Ausrichtung um einen neuen Punkt im Schallfeld zu fokussieren. Sie wird bei einem Array elektronisch realisiert.

Der Einsatz von Sensorarrays ist nicht auf die Akustik beschränkt. Dieses Verfahren wird bereits seit einigen Jahrzehnten erfolgreich in der Radioastronomie, der Sonar- und Radartechnologie sowie in der Medizin zu Ortungszwecken eingesetzt.

Das Prinzip, das dem Beamforming zu Grunde liegt, lässt sich am einfachsten über das Beschreiben des allgemeinen Delay-and-Sum Algorithmus, nach [3], an einem eindimensionalen Array (Linienarray) verdeutlichen.

Das in Abbildung 2.1 gezeigte Linienarray mit m Mikrofonen, deren Positionen durch den Richtungsvektor \vec{r}_m beschrieben werden, erreicht ein Schalldrucksignal $p(t)$ einer sich im Fernfeld befindlichen Schallquelle mit dem Wellenzahlvektor \vec{k} .

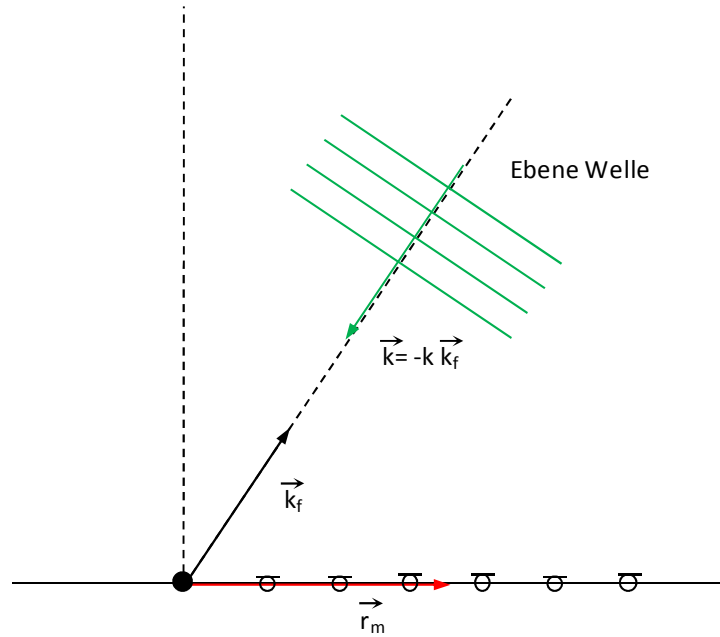


Abbildung 2.1: Funktionsprinzip eines Arrays mit \vec{k}_f , dem Vektor der Fokusrichtung des Beamformers und \vec{k} , dem Wellenvektor einer aus dem Fernfeld einfallenden ebenen Welle [3]

Bei der Anwendung des Delay-and-Sum Beamformer-Algorithmus werden die an den Mikrofonen erfassten Schalldrucksignale $p_m(t)$ individuell zeitlich verschoben und aufsummiert.

$$b(\vec{k}_f, t) = \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \tau_m(\vec{k}_f)) \quad (2.1)$$

Mit w_m , einem für jedes Mikrofon individuellen Wichtungsfaktor und \vec{k}_f , dem Richtungsvektor der Fokusrichtung. Die mikrofonenspezifische Laufzeitkorrektur τ_m wird mit der Zielsetzung gewählt, eine spezifische Ausrichtung des Fokusvektors zu erlangen und so Signale, die der ebenen Welle aus der Richtung \vec{k}_f zugeschrieben werden, vor dem Aufsummieren zeitlich (phasengleich) zu überlagern.

$$\tau_m = \frac{\vec{k}_f \cdot \vec{r}_m}{c_0} \quad (2.2)$$

Hierbei steht c_0 für die Schallgeschwindigkeit. Signale, die das Array aus einer anderen Richtung als \vec{k}_f erreichen, werden durch das zeitliche Verschieben nicht phasengleich vor dem Aufsummieren überlagert. Daraus ergibt sich eine Richtwirkung des Arrays.

Überführt man Gleichung (2.2) in den Frequenzbereich, so erhält man das Ausgangssignal des Beamformers zu

$$B(\vec{k}_f, \omega) = \sum_{m=1}^M w_m \underline{P}_m(\omega) e^{-j\omega \tau_m(\vec{k}_f)} = \sum_{m=1}^M w_m \underline{P}_m(\omega) e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_m} = B(\vec{k}, \omega) . \quad (2.3)$$

Mit ω der Kreisfrequenz und $\vec{k} = -k\vec{k}_f$ dem Wellenzahlvektor, dem aus der Fokusrichtung \vec{k}_f einfallenden ebenen Welle. Der Betrag des Wellenzahlvektors \vec{k} ist gleich der Wellenzahl k und ergibt sich aus

$$|\vec{k}| = k = \frac{\omega}{c_0} . \quad (2.4)$$

Über die Wahl von $\tau_m(\vec{k}_f)$ bzw. dem bevorzugten Wellenzahlvektor \vec{k} wird das Array in eine spezifische Richtung des Schallfeldes ausgerichtet. Ideal wäre das Erfassen von Signalen, welche ausschließlich aus dieser definierten Richtung auf das Array treffen um so ein Schallquelle exakt lokalisieren zu können. Für die Unterdrückung von Schallwellen, welche das Array nicht aus der fokussierten Richtung erreichen, nehmen wir folgende Situation an. Eine ebene Welle mit einem Wellenvektor \vec{k}_0 trifft aus einer nicht fokussierten Richtung kommend ($\vec{k}_0 \neq \vec{k}$) auf das Array (Abbildung 2.2).

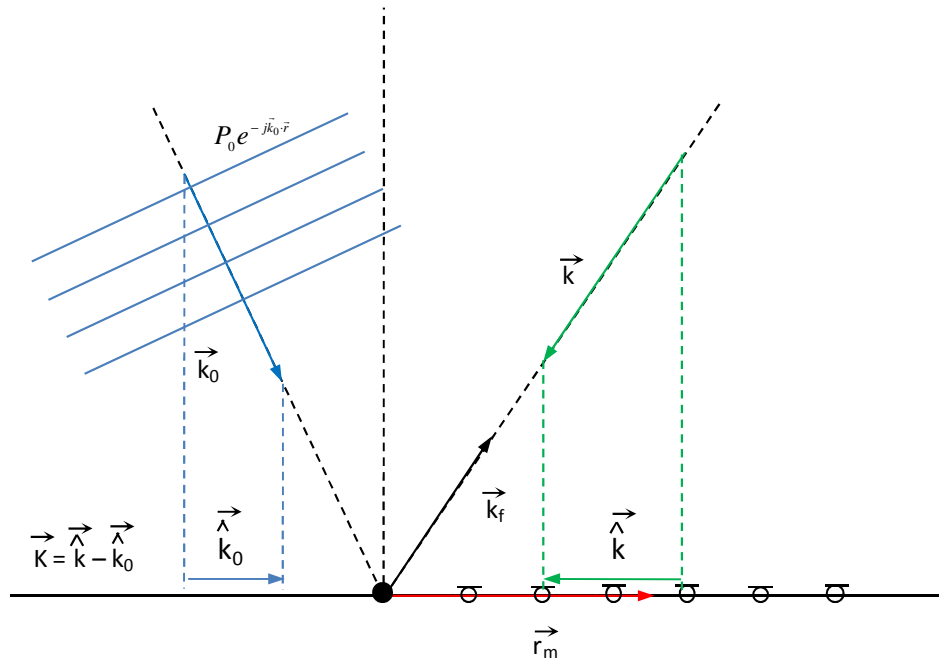


Abbildung 2.2: Eine ebene Schallwelle mit dem Wellenzahlvektor \vec{k}_0 erreicht das Array aus einer von der Fokusrichtung \vec{k}_f abweichenden Richtung; mit \vec{k} gleich der Differenz von \vec{k} und \vec{k}_0 , den in die Arrayebene projizierten Wellenzahlvektoren von \vec{k} und \vec{k}_0 [3]

Der Schalldruck, der am m-ten Mikrofon erfasst wird, ergibt sich aus

$$\underline{P}_m(\omega) = P_0 e^{-j\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_m} \quad (2.5)$$

und der Gleichung (2.3) zu

$$B(\vec{k}_f, \omega) = P_0 \sum_{m=1}^M w_m e^{j(\vec{k} - \vec{k}_0) \cdot \vec{r}_m} = P_0 \underline{W}(\vec{k} - \vec{k}_0) \quad (2.6)$$

mit der Funktion \underline{W} ,

$$\underline{W}(\vec{K}) = \sum_{m=1}^M w_m e^{j\vec{K} \cdot \vec{r}_m} . \quad (2.7)$$

Das Ausgangssignal des Beamformers ist eine Funktion, die vom Wellenzahlvektor \vec{K} , der Differenz von \vec{k} und \vec{k}_0 der in die x-Ebene des Linienarrays projizierten Wellenzahlvektoren \vec{k} und \vec{k}_0 . Die Funktion $\underline{W}(\vec{K})$ wird als Array-Pattern bzw. Antwortfunktion des Arrays bezeichnet. Ist der individuelle Wichtungsfaktor w_m für jedes Mikrofon gleich 1, ist die Richteigenschaft des Arrays nur noch von seiner Geometrie abhängig.

Für ein eindimensionales Array (Linienarray) ergibt sich die Abhängigkeit von $\underline{W}(\vec{K})$ nur von der x-Komponente, $K_x = K$, des Wellenzahlvektors \vec{K} . Eine typische Antwortfunktion für ein Linienarray ist im Folgenden abgebildet.

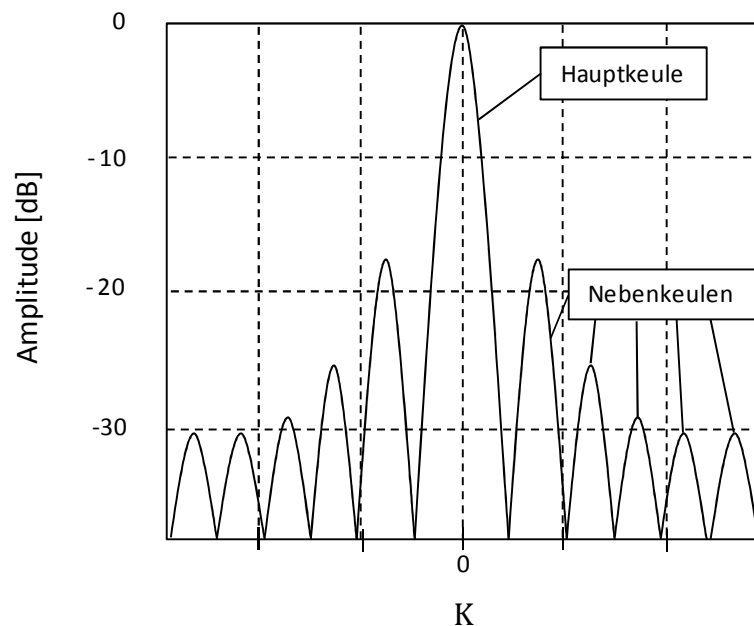


Abbildung 2.3: Antwortfunktion eines Linienarrays

Die Hauptkeule beschreibt die Hauptempfangsrichtung des Arrays.

Nebenkeulen zeigen die Dämpfungseigenschaft eines Arrays für nicht aus Fokusrichtung einfallende Schallwellen. Sie können als Nebenempfangsrichtungen beschrieben werden.

In dem Fall $\vec{k} = \vec{k}_f$ ergibt sich für den Beamformer ein um die Anzahl der Mikrofone verstärktes Ausgangssignal. Deshalb wird dieses oftmals über die Mikrofonanzahl normiert.

$$B(\vec{k}_f, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \underline{p}_m(\omega) e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_m} \quad (2.8)$$

Nachdem das dem Beamforming zu Grunde liegende Prinzip kurz erläutert wurde, sollen im Folgenden Qualitätskriterien zur Bewertung der unterschiedlichen erhältlichen Arraygeometrien erläutert werden. Die in der Literatur [30] dazu aufgeführten Kriterien sind die Hauptkeulenbreite (HKB), die aus ihr resultierende Auflösung und der Signal-Rausch-Abstand (SNR).

Die Auflösung oder das Auflösungsvermögen eines Beamformers beschreibt dessen Fähigkeit nahe beieinander liegende Schallquellen zu unterscheiden. Zur Ermittlung der Auflösung wird das Rayleigh-Kriterium herangezogen. Dieses besagt, dass zwei Quellen noch unterscheidbar sind, also auflösbar, wenn das erste Minimum des Array-Patterns der einen Quelllokalisierung auf das Maximum des Array-Patterns der anderen fällt. Somit ist die Auflösung direkt von der Hauptkeulenbreite (HKB) abhängig (siehe Abbildung 2.4). Diese bildet damit eine weitere charakteristische Kenngröße eines Arrays. Die HKB wird in [15], [30] als 3 dB-Breite angegeben (siehe Abbildung 2.8).

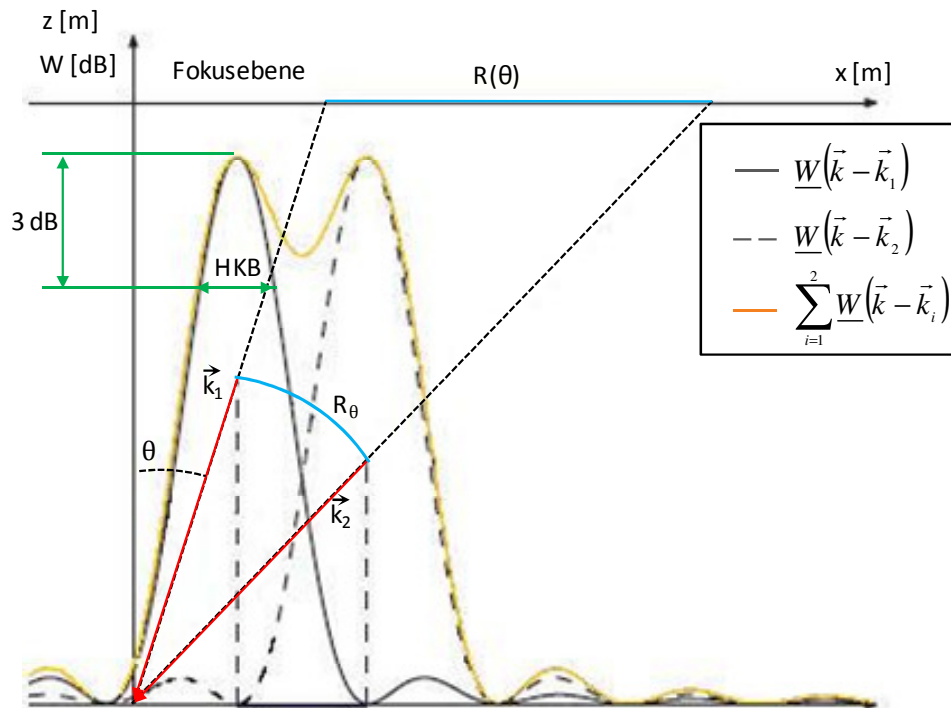


Abbildung 2.4: Darstellung des Rayleigh-Kriteriums zur Trennung zweier Quellen; mit dem Array-Pattern zweier mit \vec{k}_1 und \vec{k}_2 einfallenden Schallwellen und dem resultierenden Ausgangssignal des Beamformers [3]

Die Hauptkeulenbreite (HKB) und damit die Auflösung sind von der Frequenz und der Länge des Arrays (Apertur) abhängig. In Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 ist der Einfluss dieser Größen illustriert. Man erkennt eine deutliche Abnahme der HKB mit der Erhöhung der Frequenz und der Apertur. Weiter wird die Lage und Ausprägung der Nebenkeulen von diesen beiden Parametern beeinflusst.

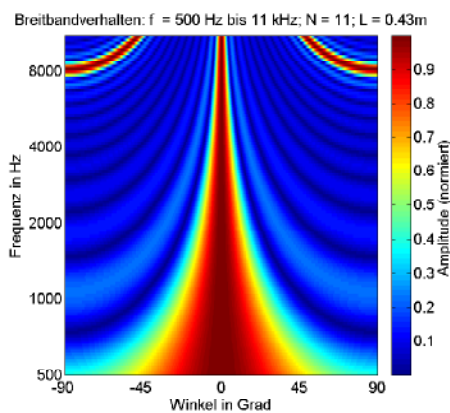


Abbildung 2.5: Verhalten eines Linienarrays bei Erhöhen der Sendefrequenz (konstante Geometrie) [15]

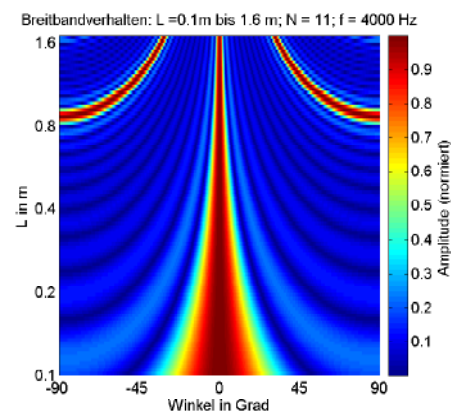


Abbildung 2.6: Verhalten eines Linienarrays bei Veränderung der Aperturlänge (konstante Sendefrequenz) [15]

Geht man von einer kontinuierlichen Verteilung der Mikrofone aus, so kann man nach [3] das vom Einfallswinkel θ abhängige Auflösungsvermögen $R(\theta)$ für eine sich im Nahfeld des Arrays befindliche Quelle über

$$R(\theta) = \frac{a}{\cos^3 \theta} \cdot \frac{z}{D} \lambda \quad (2.9)$$

berechnen. D beschreibt dabei die Aperturlänge, z den Abstand zwischen Array und Fokusebene und λ die Wellenlänge der von der Quelle abgestrahlten Schallwelle. Der Faktor a ist ein für die Geometrie des Arrays spezifischer Faktor, der für lineare Aperturen $a = 1$ und für Kreisaperturen $a \approx 1,22$ beträgt. Die Auflösung für Quellen auf der Arraynormalen (siehe Abbildung 2.7) ergibt sich daraus zu

$$R_{Axis} = a \left(\frac{z}{D} \right) \lambda . \quad (2.10)$$

Große Werte für $R(\theta)$ bzw. R_{Axis} bedeuten ein schlechtes Auflösungsvermögen, d.h. zwei Quellen lassen sich nur bei großem Abstand von einander trennen. Während kleine Werte für eine gute Auflösung stehen.

Mit zunehmendem Winkel zwischen der Arraynormalen und der Schallquelle verschlechtert sich die Auflösung und es kommt zu Verzerrungen der Abbildung der Schallquelle. Aus diesem Grund beschränkt man in der Praxis den Öffnungswinkel des Arrays auf $\theta = \pm 30^\circ$ ([3], [15]). Der damit vom Array erfassbare Bildbereich beträgt $B \approx 1,15 z$. Es ist somit ein Kompromiss zwischen Auflösung und erfassbarem Bildbereich zu wählen.

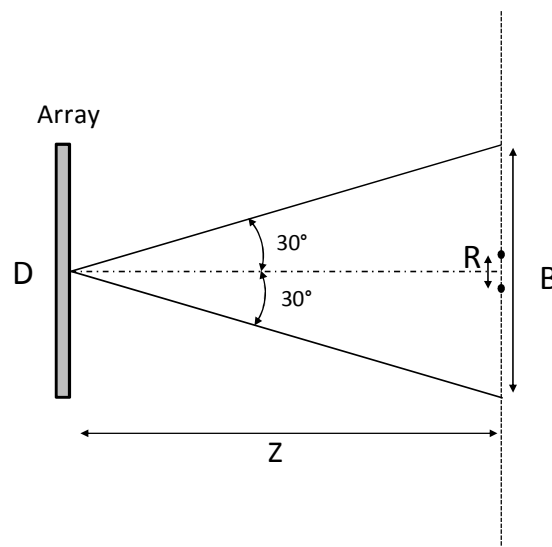


Abbildung 2.7: Auflösungsvermögen eines Arrays im Nahfeld für auf der Arraynormalen befindliche Quellen [3], [15]

Um Aliasing-Effekte zu vermeiden, muss neben dem allgemein gültigen zeitlichen Abtasttheorem noch ein räumliches eingehalten werden [15]. Dieses besagt, dass die Wellenlänge λ einer aus der Längsrichtung des Arrays einfallenden Schallwelle mindestens doppelt so groß sein muss wie der kleinste Abstand d_{\min} zwischen den Mikrofonen eines Arrays.

$$d_{\min} \leq \frac{\lambda}{2}, \text{ für } \theta = 90^\circ \quad (2.11)$$

Wird das räumliche Abtasttheorem nicht eingehalten, so kommt es zur Wiederholung der Hauptkeulen (siehe Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6).

Als Signal-Rausch-Abstand SNR wird der Pegelunterschied zwischen Hauptkeule und der höchsten im Array-Pattern auftretenden Nebenkeule definiert (siehe Abbildung 2.8). Je größer der SNR, desto stärker wird die Entstehung von Geisterbildern durch Nebenkeulen unterdrückt, die bei Unkenntnis der Schallfeldsituation fälschlicherweise als weitere Quellen angesehen werden können.

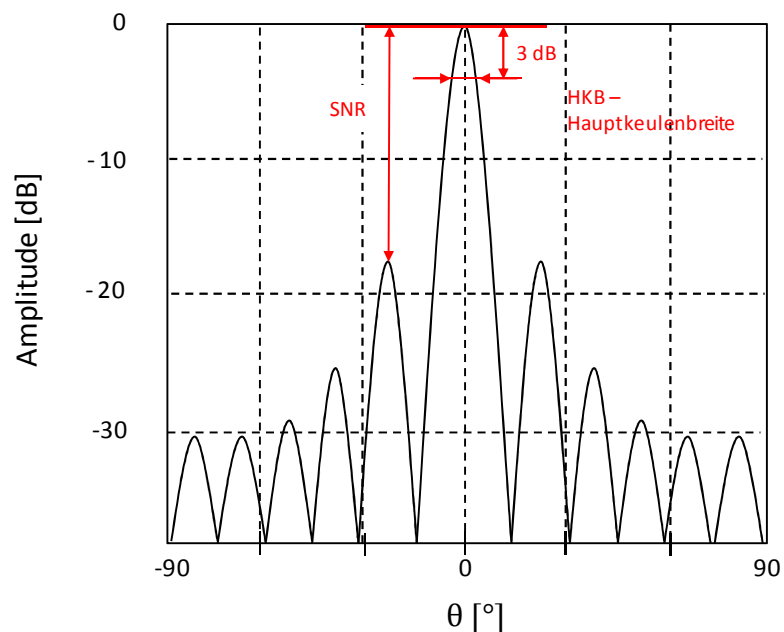


Abbildung 2.8: Definition der Hauptkeulenbreite (HKB) und des Signal-Rausch-Abstands (SNR) eines Array-Patterns

3 Elektronische Konstruktion

3.1 Elektromechanischer Wandler

Erstes Glied in der Kette akustischer Messungen sind, nach der Schallübertragung durch das umgebende Medium, die Mikrofone. Sie stellen elektroakustische Wandler dar und wandeln den auf die Membran treffenden Wechselschalldruck in eine elektrische Größe. Auf Grund der in der Normung aufgeführten Genauigkeitsanforderungen und des großen nutzbaren Frequenzbereiches haben sich bei der messtechnischen Erfassung von Schallfeldkenngößen Kondensatormikrofone etabliert [23].

Grundsätzlich kann man den Aufbau eines Kondensatormikrofons durch das Anordnen einer hauchdünnen (1 bis 10 μm) und sehr leichten Membran aus Metall oder einer metallisierten Kunststoffolie vor einer massiven, gelochten oder mit Sacklöchern versehenen elektrisch leitenden Gegenelektrode beschreiben (Abbildung 3.1). Der Abstand der Membran zur Gegenelektrode beträgt dabei ca. 5 bis 50 μm . Desweiteren besitzen Mikrofonskapseln eine Druckausgleichskapillare, welche für sehr tiefe Frequenzen, wie die Änderung des statischen Luftdrucks, eine Koppelung des Kapselinneren mit der Umgebung schaffen. Der Druckunterschied zwischen dem Kapselinneren und der Umgebung wird ausgeglichen. Dadurch erfolgt keine Auslenkung der Membran mehr. Für höhere Frequenzen wird das Kapselinnere, auf Grund der Trägheit des in der Kapillare mitschwingenden Luftvolumens, vom Umgebungsluftdruck entkoppelt. Ohne diesen Druckausgleich würde die Membran bei kleinen Schwankungen des statischen Luftdrucks zerstört werden.

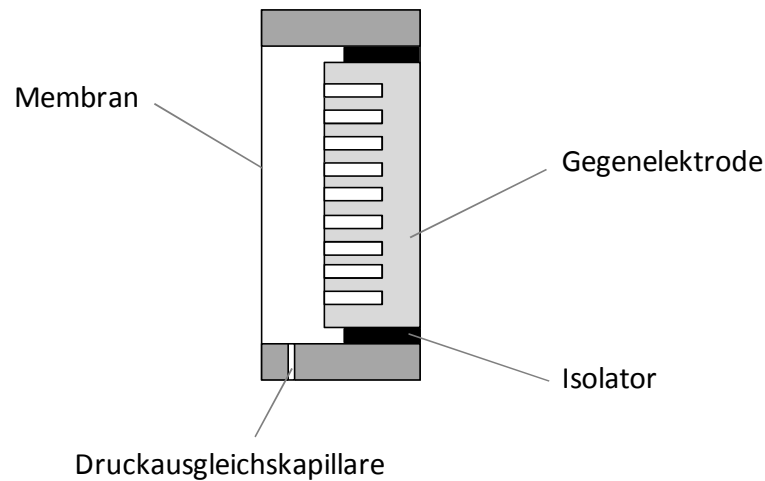


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau einer Kondensatormikrofon-Kapsel (Druckempfänger) [13]

Bei den in der akustischen Messtechnik Anwendung findenden Kondensatormikrofonen werden fast ausschließlich Druckempfänger verwendet. Bei diesen ist, im Gegensatz zu Druckgradientenempfängern, nur der Vorderteil der Membran dem Schallfeld ausgesetzt. Die Membran reagiert auf alle an ihrer Oberfläche auftretenden Schalldruckschwankungen, gleichgültig in welche Richtung sich die Schallwelle ausbreitet. Druckempfänger besitzen daher keine Richtwirkung und haben für tiefe Frequenzen eine „Kugelcharakteristik“. Druckgradientenempfänger hingegen besitzen je nach Bauart eine Richtcharakteristik und finden deshalb in Richtmikrofonen Verwendung (siehe Abbildung 3.2).

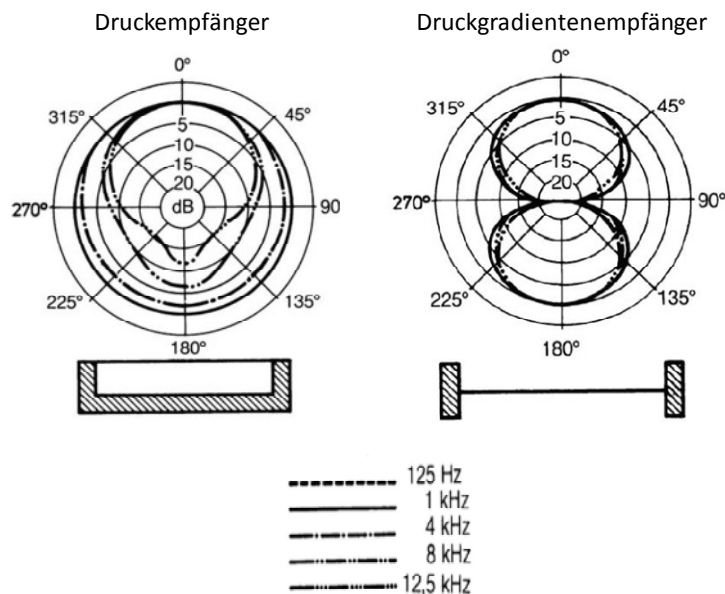


Abbildung 3.2: Richtcharakteristik von Druck- und Druckgradientenempfängern [7]

Das Wandlerprinzip eines Kondensatormikrofons beruht auf der Kapazitätsänderung des Kondensators bei der Membranauslenkung x (Abbildung 3.3). Die Ruhekapazität C_0 eines Plattenkondensators ist entgegengesetzt proportional zum Plattenabstand d .

$$C_0 \sim \frac{1}{d} \quad (3.1)$$

Wenn der Plattenabstand bei wirkender Beschallung um x verändert wird, ergibt sich

$$C \sim \frac{1}{d - x} \quad (3.2)$$

Aus dem Verhältnis von (3.1) und (3.2) folgt

$$C = C_0 \frac{d}{d - x} = C_0 \frac{1}{1 - \frac{x}{d}} \quad (3.3)$$

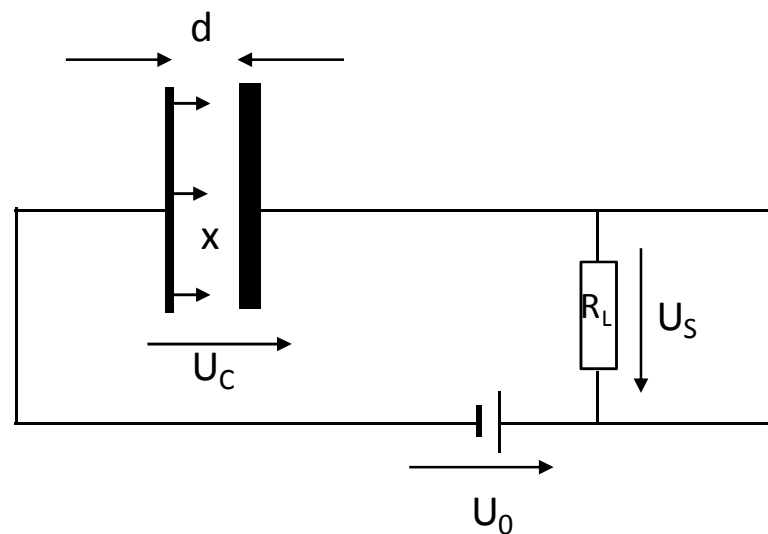


Abbildung 3.3: Prinzip des Kondensatormikrofons [23]

Um eine elektrische Signalspannung am Ausgang abnehmen zu können, muss der Mikrophon-Kondensator zuerst mit einer Gleichspannung aufgeladen werden. Der Kondensator wird dabei über den Ladewiderstand R_L durch die Gleichspannung U_0 geladen. Die Größe von R_L und C_0 in der Kapselschaltung bestimmen die elektrische untere Begrenzung des Frequenzgangs, die durch die Knickfrequenz ω_1' gegeben ist.

$$\omega_1' = \frac{1}{R_L C_0} \quad (3.4)$$

Die Ruhekapazität beträgt in der Regel nur wenige 10^{-11} F. Für U_0 sind Werte zwischen 20 und 200 V üblich, wobei die Vorspannung durch die Überschlagsgefahr zwischen den Elektroden begrenzt wird.

Aus der Definition der Kapazität und (3.3) ergibt sich für die Schaltung die Kondensatorspannung U_C , aus dem Verhältnis der Ladung Q des Kondensators zu seiner Kapazität.

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_0} \left(1 - \frac{x}{d}\right) . \quad (3.5)$$

Die Ausgangsspannung U_S ergibt sich damit aus dem Maschensatz

$$U_C + U_S - U_0 = 0$$

zu

$$U_S = U_0 - U_C . \quad (3.6)$$

Eine sehr einfache und nur für niedrige Frequenzen versagende Charakterisierung des Mikrofonfrequenzgangs erhält man mit folgender Überlegung. Wenn der Ausgangswiderstand R_L wesentlich größer als der Wechselstromwiderstand $1/j\omega C_0$ des Kondensators ist, dann wird der Stromkreis quasi „offen“ betrieben. Damit fließt für Frequenzen $\omega \gg 1/R_L C_0$, nahezu kein Strom im Stromkreis. Die Ladungen auf den Elektroden lassen sich als unveränderlich annehmen, $Q \approx Q_0^1$, und für U_C in (3.5) gilt näherungsweise

$$U_C = \frac{Q_0}{C_0} \left(1 - \frac{x}{d}\right) = U_0 \left(1 - \frac{x}{d}\right) . \quad (3.7)$$

Für U_S ergibt sich nach (3.6) damit

$$U_S = U_0 \frac{x}{d} \quad (3.8)$$

Die Ausgangsspannung U_S ist somit direkt proportional zur Membranauslenkung x .

Der Mikrofonkondensator bildet mit seiner festeing gespannten federnden Membran einen Resonator. Dessen Auslenkung \underline{x} kann nach [23] wie folgt beschrieben werden.

¹ Die Annahme der unveränderlichen Ladungen auf dem Kondensator ist zum einen hinreichend genau, zum anderen für dauerpolarisierte Mikrofone, z.B. Elektret-Mikrofone, maßgeblich.

$$\underline{x} = \frac{\frac{\underline{F}}{s}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad (3.9)$$

Dabei ist \underline{F} die Membran anregende Kraft, s die Gesamtfedersteife und ω_0 die Resonanzfrequenz. Unter Verwendung der Gleichung (3.9) und der Voraussetzung, dass die auf die Membran wirkende Kraft \underline{F} gleich dem Produkt aus Druck \underline{p} und Membranfläche S ist,

$$\underline{F} = \underline{p} S_M \quad (3.10)$$

ergibt sich der Frequenzgang des Kondensatormikrofons für den Frequenzbereich $\omega \gg 1/R_L C_0$ zu

$$\frac{\underline{U}_S}{\underline{p}} = \frac{U_0 \frac{S_M}{sd}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{\omega_0}} = \underline{G}_{up} \quad (3.11)$$

\underline{G}_{up} beschreibt für den Frequenzbereich $\omega \gg 1/R_L C_0$ den Übertragungsfaktor zwischen dem auf die Mikrofonmembran einwirkenden Schalldruck \underline{p} und der am Ausgang des Mikrofons anliegenden Signalspannung \underline{U}_S .

Im linearen Übertragungsbereich, $\omega_1' \ll \omega \ll \omega_0$, erhält man die Empfindlichkeit des Kondensatormikrofons über

$$G_{up,0} = \frac{S_M}{sd} U_0 \quad (3.12)$$

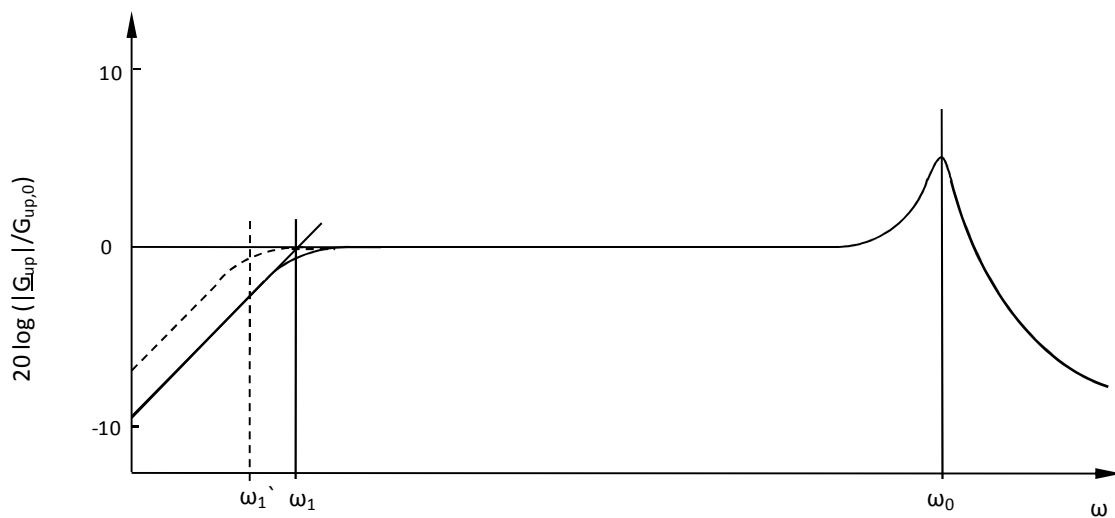


Abbildung 3.4: Theoretischer Frequenzgang eines Kondensatormikrofons

Die theoretische Resonanzfrequenz beträgt dabei

$$\omega_0^2 = \frac{s}{m} \quad , \quad (3.13)$$

wobei sich die Gesamtsteife s aus zwei Anteilen zusammensetzt [23]. Der Steifeanteil s_E repräsentiert dabei die Lagersteife der Membran, deren Masse mit m gegeben ist, und s_L , den Steifeanteil des von den Elektroden eingeschlossenen Luftvolumens.

$$s = s_E + s_L \quad (3.14)$$

Die Gesamtsteife s wird maßgeblich von der Lagersteife der Membran bestimmt [22] [23]. Somit ist es möglich, bei der Betrachtung der Resonanzfrequenz den Steifeanteil s_L zu vernachlässigen und ω_0 lässt sich nach Gleichung (3.15) berechnen. Durch die Perforation der Gegenelektrode wird dem Luftvolumen zwischen den beiden Elektroden die Möglichkeit gegeben in den Luftraum hinter der Elektrode zu gelangen und so einer wesentlich geringeren Komprimierung ausgesetzt zu werden. Die Luft, die beim Passieren der Bohrungen Reibung ausgesetzt ist, bedämpft die Resonanzspitze [23].

Unter der oben genannten möglichen Vernachlässigung von s_L ergibt sich die Resonanzfrequenz zu

$$\omega_0^2 = \frac{s_E}{m} = \frac{s_E}{m'' S_M} \quad . \quad (3.15)$$

Wobei m'' die flächenbezogene Masse des Membranwerkstoffs und S_M deren Querschnittsfläche bezeichnet.

Konstruktiv wird die Resonanzfrequenz in einen Frequenzbereich gelegt, der weit über dem hörbaren Frequenzbereich liegt ([21], [22], [23]).

Bisher erfolgt die Bestimmung der unteren Begrenzung des linearen Frequenzgangs nur über die Knickfrequenz ω_1 . Die Knickfrequenz ω_1 , welche aus der Eigenschaft der Druckausgleichskapillare hervorgeht, liegt allerdings höher als ω_1 und stellt die tatsächliche Begrenzung des linearen Frequenzgangs dar. Sie ist durch die sich in der Kapillare befindlichen Luftmasse m_k und die Querschnittsfläche der Kapillare S_Q für eine Druckdifferenz Δp zwischen Umgebung und Kapselinnenraum wie folgt gegeben [24]:

$$\Delta p = \omega_1 \frac{m_k}{S_Q} \quad . \quad (3.16)$$

Damit erreicht man für tiefe Frequenzen den Druckausgleich $\Delta p \approx 0$ und für hohe Frequenzen eine Entkoppelung des Kapselinnenraums von der Umgebung.

Eine Beschreibung dieser Zusammenhänge unter konstruktiven Gesichtspunkten ist in [22] zu finden. Dabei wird zur Berechnung der Mikrofoneigenschaften durch reale materialspezifische Kenngrößen auf elektromechanische Analogien zurückgegriffen.

Das Kondensatormikrofon in Elektretbauweise

Das Elektretmikrofon ist ein elektromechanischer Wandler, gleich dem Kondensatormikrofon, mit der Besonderheit, dass er ohne elektrische Vorspannung auskommt. Allein der in die Kapsel integrierte Impedanzwandler benötigt eine Spannung die sehr gering ist, so dass ein Elektretmikrofon z.B. mit Batterien über einen langen Zeitraum betrieben werden kann. Der Grund hierfür ist die Verwendung eines sogenannten Elektrets. Als Elektrete werden Stoffe bezeichnet, die, analog dem Verhalten dauermagnetischer Werkstoffe, elektrisch polarisiert bleiben. Dies wird durch Schmelzen bestimmter Kunststoffe erreicht, die während der Schmelze und dem darauffolgenden Abkühlvorgang einem elektrischen Feld ausgesetzt sind. Die „elementaren Elektrete“ des Materials richten sich nach dem einwirkenden elektrischen Feld aus. Erkalte der Kunststoff und nimmt wieder einen festen Zustand an, bleibt die Ausrichtung der Teilchen erhalten. Heutzutage wird die Dauerpolarisierung durch Elektronenbeschuss realisiert [13]. Das bevorzugte Elektretmaterial sind Folien aus hochpolymeren Kunststoffen, insbesondere ist hier Teflon (PTFE) zu nennen. Um die Elektretfolie vor einer Veränderung des Ladungsbildes zu schützen wird sie metallisiert. War die begrenzte Lebensdauer am Anfang der Entwicklung noch ein großes Problem, kann diese heute, durch Verwendung neuer Grundwerkstoffe und bei entsprechender Lagerung, für einige Jahrzehnte garantiert werden (Abbildung 3.5), [31].

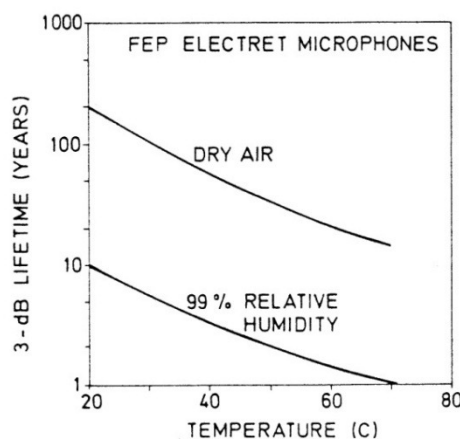


Fig. 7.4. Minimum 3-dB lifetime of FEP electret microphones, estimated from literature values

Abbildung 3.5: Lebensdauer von Elektreten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen [31]

Die Flächenladung auf der Oberfläche der metallisierten Elektretfolie ruft durch Influenz eine entgegengesetzte Flächenladung auf der Gegenelektrode hervor. Der daraus resultierende Ladungsunterschied wirkt wie eine von außen aufgebrachte Polarisationsspannung und erreicht eine Größenordnung von 100 V.

Elektretfolien sind nur schlecht als Mikrofonmembranen geeignet, deshalb werden in der Regel die Gegenelektroden elektretbeschichtet und die Mikrofonmembran aus herkömmlichen Materialien gefertigt. Auf diese Art konstruierte Mikrofone werden als Back-Elektretmikrofone bezeichnet. Eine als Back-Elektretmikrofon konstruierte Kapsel ist in Abbildung 3.6 zu sehen.

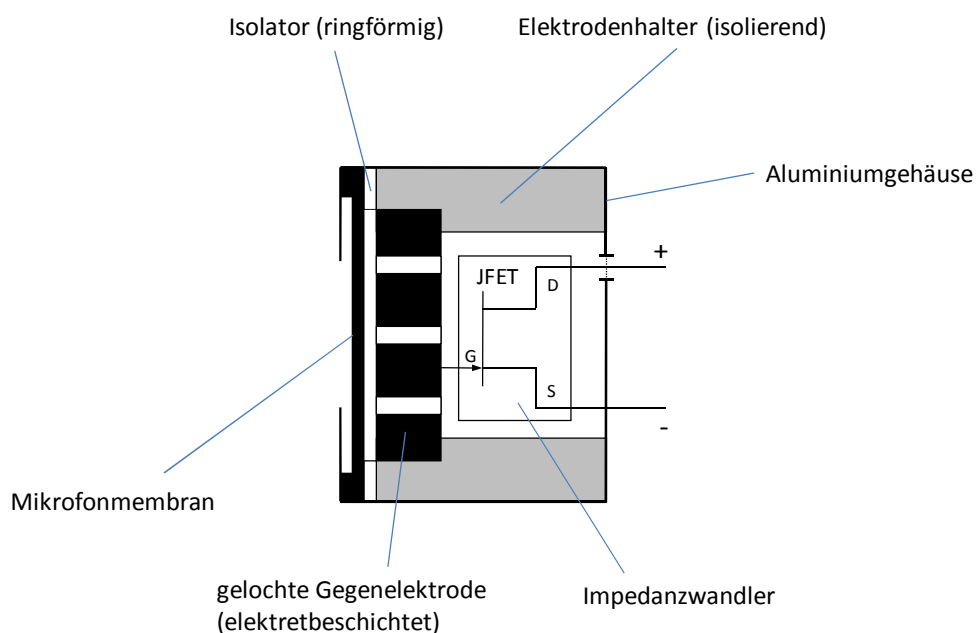


Abbildung 3.6: Schematischer Aufbau des Back-Elektretmikrofons

Die Membran wird dabei auf einen metallischen Ring gespannt und formschlüssig in das Kapselgehäuse eingelegt, wodurch sie eine elektrische Verbindung mit dem Gehäuse besitzt. Die Dicke des zwischen Gegenelektrode und Membran liegenden ringförmigen Isolators definiert den Abstand der beiden zueinander. Die gelochte Gegenelektrode ist im Vergleich zur Membran äußerst massiv und mit dem Elektret beschichtet. Der dem Elektretkondensator nachgeschaltete Impedanzwandler, dessen Gate-Anschluss mit der Gegenelektrode verbunden ist und dessen Source- und Drain-Anschluss rückseitig aus dem Kapselgehäuse geführt werden, wandelt das hochimpedante Ausgangssignal des Kondensators in ein niederimpedantes Signal. Dabei ist der Source-Anschluss mit dem Kapselgehäuse verbunden. Das zum technischen Aufbau der Kapsel zugehörige Beschaltungsschema wird in Abbildung 3.7 aufgezeigt.

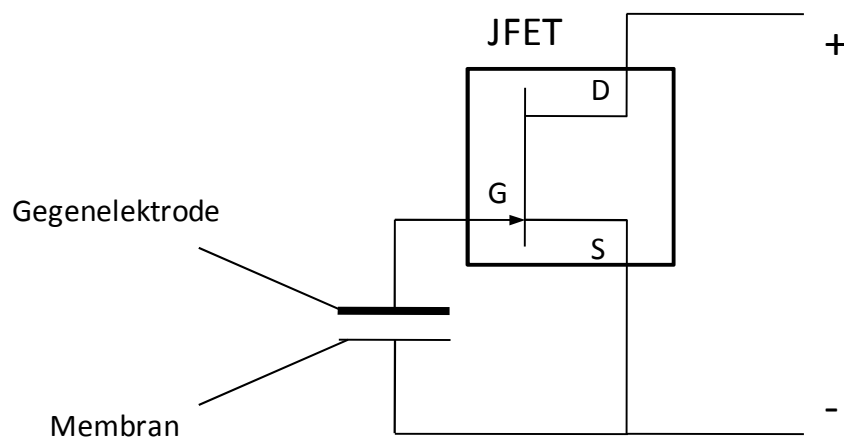


Abbildung 3.7: Schaltungsschema des Impedanzwandlers (JFET) einer Elektretmikrofon-Kapsel [13]

Als Impedanzwandler kommt oft ein JFET (Sperrschicht-Feldeffekttransistor) zum Einsatz, der das Signal des Elektretkondensators nicht verstärkt, sondern nur in ein niederimpedantes Signal wandelt. Er besteht aus einer n-leitenden Kristallstrecke, in dessen Seite zwei, miteinander verbundene, p-leitende Zonen eindotiert sind und als Gate-Anschluss (G) aus dem Bauteil geführt werden. Der n-Kanal besitzt zwei Anschlüsse, Drain (D) und Source (S) (Abbildung 3.8). Wird der JFET ohne eine Spannung am Gate beschaltet, wirkt dieser wie ein ohmscher Widerstand. Legt man eine negative Spannung U_{GS} zwischen Gate und Source an, bildet sich um die p-Zonen ein elektrisches Feld, das den n-Kanal verengt. Die Verengung des n-Kanals hat eine Vergrößerung des Widerstands des JFET zur Folge. Je kleiner U_{GS} , desto weiter wird der n-Kanal durch das elektrische Feld verengt und desto größer wird der Widerstand im n-Kanal. Über U_{GS} wird der Gesamtwiderstand des JFET bestimmt. Bei negativer U_{GS} wirkt der p-n-Übergang zwischen Gate und Source wie eine in Sperrrichtung geschaltete Halbleiterdiode, in der bis auf extrem kleine Restströme kein Strom fließt und sich ein sehr hoher Eingangswiderstand ergibt. Der Ausgangswiderstand hingegen ist klein und abhängig von der Breite des n-Kanals und dem Grundwiderstand des n-leitenden Materials. Die in Abhängigkeit des an der Membran auftretenden Schalldrucks entstehende Kondensatorspannung moduliert den Gesamtwiderstand des JFET.

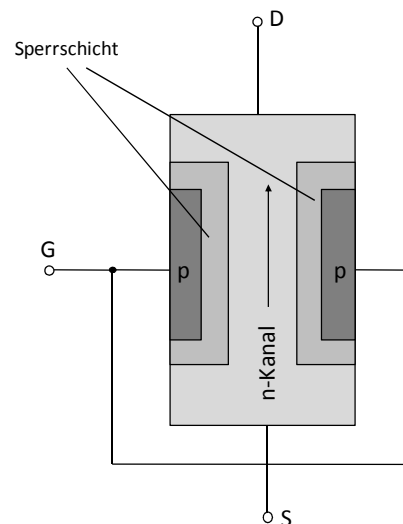


Abbildung 3.8: Schematischer Aufbau eines JFET [29]

Auf Grund des geringen Aufwands der Impedanzwandlerschaltung und der einfachen maschinellen Fertigung sind Elektretmikrofone in ihrer Herstellung sehr günstig. Daher sind sie der meist produzierte Mikrofontyp (90% der weltweiten jährlichen Produktion) [13]. Ihr Haupteinsatzgebiet sind u.a. Anwendungen in der Unterhaltungselektronik, z.B. in Mobiltelefonen.

3.2 IEPE-Konditionierung

3.2.1 IEPE-Prinzip

Das Prinzip der stromgespeisten Mess-Sensoren wurde in die Messtechnik eingeführt, um die bis dato mittels Ladungsverstärker operierenden Sensoren anwendungsfreundlicher zu gestalten ([27], [28]). Die Abkürzung des etablierten IEPE-Standard steht hierbei für „Integrated Electronics Piezo Electric“ und wird von Sensorherstellern unter Bezeichnungen wie ICP[®], Isotron[®], Deltatron[®], Piezotron[®] etc. geführt. Wie der ausgeschriebenen Bezeichnung zu entnehmen ist, wurde dieser Standard ursprünglich für piezoelektrische Sensoren, insbesondere Beschleunigungsaufnehmer, entwickelt und findet auch verstärkt in Mikrofonen Anwendung. Die in die IEPE-Sensoren integrierten Impedanzwandler bzw. Vorverstärker wandeln das hochimpedante Signal der Sensoren in ein Spannungssignal niedrigerer Impedanz. Der niederimpedante Ausgang dieser Sensoren erlaubt Sensorkabel von über 100 m Länge. Das IEPE-Prinzip ist in Abbildung 3.9 illustriert.

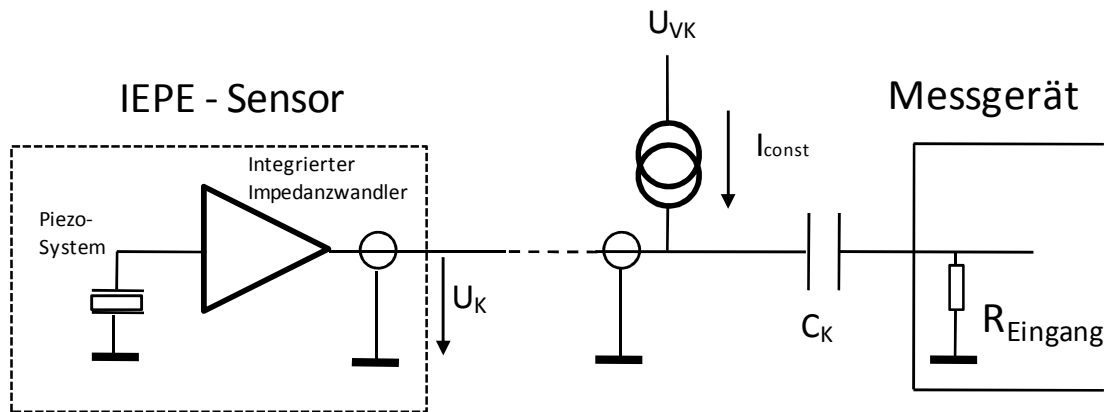


Abbildung 3.9: IEPE-Prinzip [27]

Die integrierte Elektronik wird über einen Konstantstrom I_{const} versorgt, welcher mit dem Sensorsignal über ein und dasselbe Kabel übertragen wird. Über dem Sensor bildet sich dabei in Abhängigkeit von seinem Widerstand eine positive Arbeitspunktspannung U_K , dem die Signalspannung aufmoduliert wird. Der Koppelkondensator C_K vor dem Messgeräteeingang dient der Auskoppelung des Gleichanteils. Der Konstantstrom kann zwischen 2 mA und 20 mA liegen, als optimal hat sich hierbei ein Stromstärke von 2 mA bis 4 mA erwiesen [27].

Der für die messtechnischen Untersuchungen der Mikrofone verwendete Analysator SINUS HARMONIE® sowie die Akquisitionshardware des akustischen Kamerasystems SINUS MSX16 liefern einen Konstantstrom von 2 mA.

Die Arbeitspunktspannung am Sensorausgang, d.h. die Ruhespannung ohne Signalspannung, liegt üblicherweise bei 8 V bis 12 V, wobei sie von der Konstantstromstärke sowie der Temperatur abhängig ist. Die Versorgungsspannung der Konstantstromquelle U_{VK} begrenzt die obere Aussteuerungsgrenze. Die untere Aussteuerungsgrenze wird von der Sättigungsspannung des im Sensors integrierten Impedanzwandlers bestimmt [27], (siehe Abbildung 3.10).

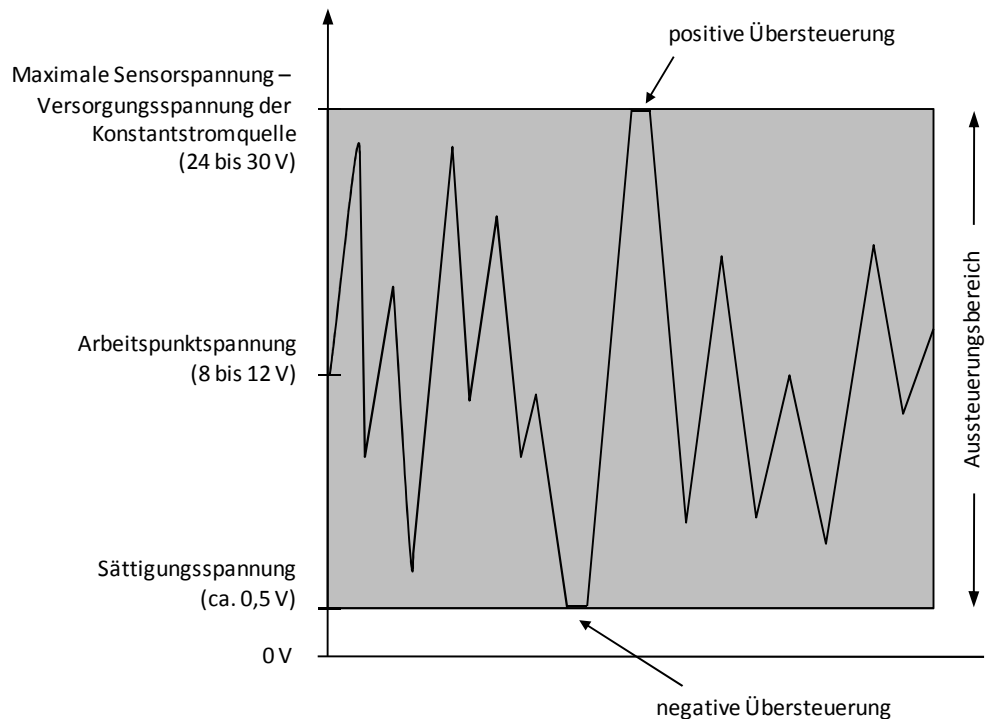


Abbildung 3.10: Aussteuerungsgrenzen eines IEPE-Sensors [27]

Die für die Konstruktion des Arrays Anwendung findenden Elektretmikrofon-Kapseln (EMK) bzw. deren Impedanzwandler werden nach Angaben des Herstellers mit einer Betriebsspannung U_B versorgt (Abbildung 3.11). Die von den Herstellern im Datenblatt der Mikrofonkapseln angegebene mögliche Betriebsspannung beträgt 2 V bis 10 V, empfohlen wird dabei eine Spannung von ca. 2 V bis 4 V.

Ziel ist die Anbindung der EMK an die IEPE-Konstantstromquelle, sodass sich eine Arbeitspunktspannung von ca. 2 V bis 4 V über der EMK einstellt.

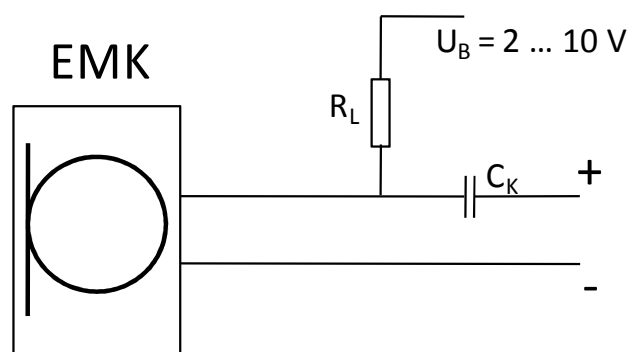


Abbildung 3.11: Betriebsspannungsversorgung einer Elektretmikrofon-Kapsel

Im ersten Schritt wurde eine Mikrofonkapsel direkt an die Konstantstromversorgung angeschlossen und die sich über der Kapsel einstellende Arbeitspunktspannung gemessen. Die ermittelte Kapselspannung U_K beträgt für alle später untersuchten Kapseln ca. 21 V

und ist damit für den Betrieb der Kapsel ungeeignet. Aus Gleichung (3.17) ergibt sich für die Beschaltung einer EMK ein Kapselwiderstand R_K , bei einem $I_{\text{const}} = 2 \text{ mA}$ und einer $U_K \approx 21 \text{ V}$, von ca. $10,5 \text{ k}\Omega$.

$$R_K = \frac{U_K}{I_{\text{const}}} \quad (3.17)$$

Für eine geforderte U_K von 2 V bis 7 V ist demnach ein Kapselwiderstand R_K von ca. $1 \text{ k}\Omega$ bis $3,5 \text{ k}\Omega$ notwendig. Da der Widerstand der Mikrofonkapsel vorgegeben ist, besteht nur die Möglichkeit, über einen der Kapsel parallel vorgeschalteten Widerstand, im Folgendem R_V genannt, den gesamten Widerstand in der Schaltung zu reduzieren.

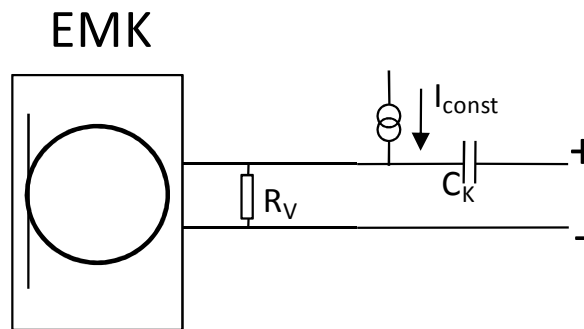


Abbildung 3.12: IEPE-Konstantstromversorgung einer Elektretmikrofon-Kapsel

Der Nachteil einer solchen Schaltung ist, dass der gegenüber R_K kleine R_V den Gesamtwiderstand R_{GES} bei Widerstandsänderung des Impedanzwandlers maßgeblich beeinflusst und so zu einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen R_K und R_{GES} führt (siehe Abbildung 3.13). Die Beziehung zwischen R_K und R_{GES} ergibt sich nach

$$R_{\text{GES}} = \frac{R_V \cdot R_K}{R_V + R_K} \quad (3.18)$$

, mit konstantem R_V .

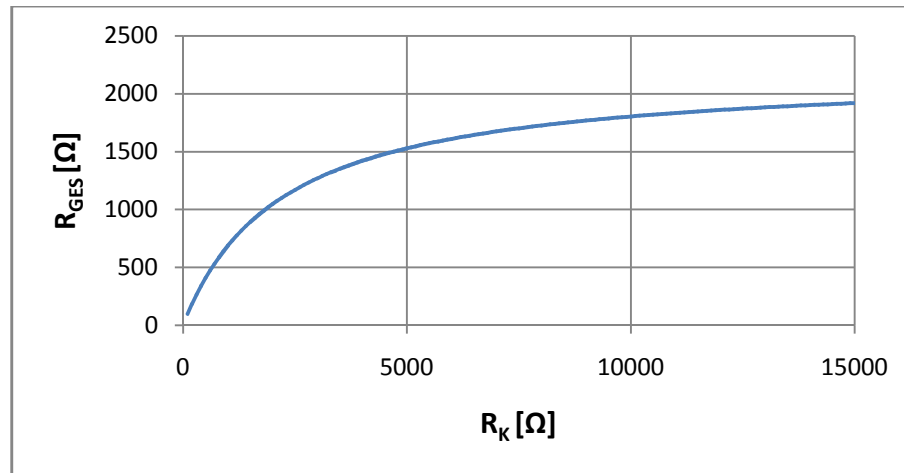


Abbildung 3.13: Zusammenhang zwischen Kapselwiderstand R_K und Gesamtwiderstand R_{GES} mit $R_V = \text{const} = 2,2 \text{ k}\Omega$

Nimmt man an, dass die Empfindlichkeit S der EMK in dieser Schaltung in der selben Größenordnung liegt wie in den Datenblättern der EMK angegeben ($S \leq 25 \text{ mV/Pa}$), und dass ein Schalldruckpegel $L_p \leq 130 \text{ dB}$ auf die Membran der EMK wirkt, ergibt sich nach Gleichung (3.20), mit p_0 dem Bezugsschalldruck, eine Signalspannung $u_s \leq 1,5 \text{ V}$, welche durch eine Widerstandsänderung des Impedanzwandlers der EMK von $\Delta R_K \approx \pm 750 \Omega$ realisiert wird.

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{u_s}{S} \cdot \frac{1}{p_0} \right) \quad (3.19)$$

$$u_s = p_0 S \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \quad (3.20)$$

Für eine solche geringe Widerstandsänderung bezüglich des Kapselwiderstands $R_K = 10,5 \text{ k}\Omega$ besteht ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen R_K und R_{GES} (Abbildung 3.14).

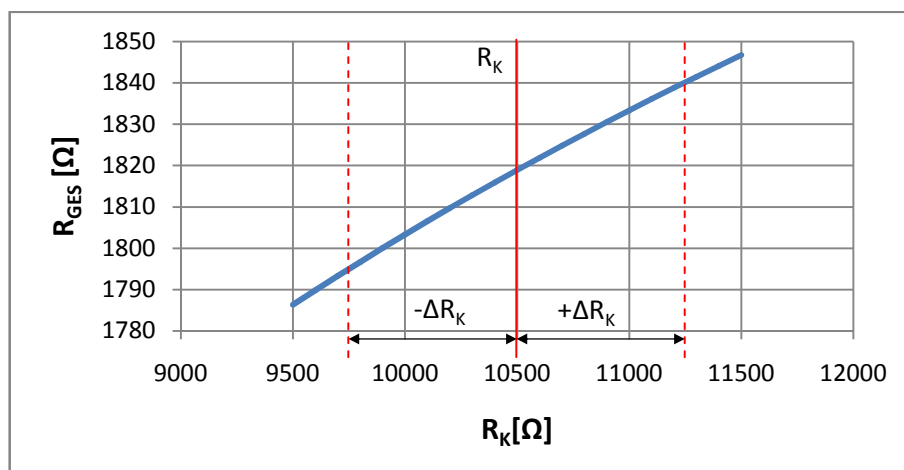


Abbildung 3.14: Nahezu linearer Zusammenhang zwischen Kapselwiderstand R_K und Gesamtwiderstand R_{GES} bei kleiner ΔR_K und $R_V = \text{const} = 2,2 \text{ k}\Omega$

Der lineare Zusammenhang zwischen R_K und R_{GES} garantiert, dass die Signalspannung der Mikrofonkapsel, die durch die Widerstandsänderung des Impedanzwandlers hervorgerufen wird, verzerrungsfrei am Ausgang der EMK- R_V -Kombination erfasst werden kann.

Zur IEPE-Konditionierung der Kapsel wird in den folgenden Untersuchungen ein R_V von 1 k Ω bis 4,7 k Ω verwendet und die sich über der EMK, mit einem R_K von 10,5 k Ω , ergebende Spannung bestimmt (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Arbeitspunktspannung U_K in Abhängigkeit vom Vorwiderstand R_V und resultierendem Gesamtwiderstand R_{GES}

R_V [k Ω]	R_{GES} [k Ω]	U_K [V]
1,0	0,9	2,0
2,2	1,8	3,8
2,7	2,1	4,7
3,2	2,5	5,5
4,7	3,2	8,0

Betrachtet man die sich in Abhängigkeit vom R_V einstellende Arbeitspunktspannung und berücksichtigt die Aussteuerungsgrenzen bei einer wie oben angenommenen maximalen Signalspannung $u_S \leq 1,5$ V, so erweisen sich bei der IEPE-Konditionierung der EMK die Verwendung von einem R_V zwischen 2,2 k Ω bis 4,7 k Ω als günstig. Kleinere Widerstände verringern die Arbeitspunktspannung U_K so weit, dass es bei hohen Signalspannungen zu negativen Übersteuerungen kommen wird. Werden hingegen zu große Vorwiderstände benutzt, wird der von den Herstellern angegebene Betriebsspannungsbereich überschritten und es können Schäden am integrierten Impedanzwandler der EMK auftreten. Inwieweit der R_V Einfluss auf die Eigenschaften der EMK nimmt, wird im folgenden Abschnitt näher untersucht.

3.2.2 Einfluss des R_V auf die Eigenschaften der Elektretkapsel

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des zur EMK parallelgeschalteten Vorwiderstands R_V und damit der veränderten Arbeitspunktspannung auf die Eigenschaften der EMK anhand der EMK K2 (siehe Tabelle 3.4) untersucht. In Folge dieser Untersuchungen wird am Ende dieses Abschnittes ein R_V gewählt, der für die Untersuchungen und den Vergleich der verschiedenen Kapseln im Abschnitt 3.3 Verwendung finden wird. Desweiteren werden die Verfahren zur Ermittlung der einzelnen Eigenschaften aufgezeigt. Diese Verfahren finden ebenfalls bei der im Abschnitt 3.3 beschriebenen Gegenüberstellung der Eigenschaften der einzelnen EMK-Typen Verwendung.

Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit S (engl. Sensitivity) gibt die von der Mikrofonkapsel abgegebene Signalspannung bei einem definierten Schalldruck $p_K = 1 \text{ Pa}$ ($L_{p,K} \approx 94 \text{ dB}$) und einer definierten Frequenz $f = 1 \text{ kHz}$ an. Die Bestimmung der Empfindlichkeit kann im reflektionsarmen Messraum, einer Druckkammer sowie einem Pistonfon oder einem Kalibrator erfolgen. Desweiteren ist die Empfindlichkeit einer Mikrofonkapsel kein konstanter Wert, sondern ist von den Umgebungsbedingungen abhängig. Hierbei ist im Wesentlichen die Temperatur zu nennen.

Die Temperaturabhängigkeit begründet sich auf dem Einfluss der Temperatur auf die Masse der eingeschlossenen Luft hinter der Mikrofonmembran. Große und plötzliche Temperaturänderungen (Temperaturschocks) können durch Änderung der mechanischen Spannung der Mikrofonmembran zu einer dauernden Änderung der Mikrofonempfindlichkeit führen. Für IEPE-konditionierte Mikrofone hat die Temperatur zusätzlich noch einen weiteren Einfluss. Der von der Konstantstromquelle abgegebene Strom ist ebenfalls temperaturabhängig. Aus diesen Gründen ist es notwendig, Mikrofone vor jedem Gebrauch neu zu kalibrieren.

In Datenblättern vieler Mikrofonkapsel-Hersteller wird die Empfindlichkeit nicht in mV/Pa , sondern in dB rel. 1V angegeben. Beide Angaben lassen sich wie folgt ineinander umrechnen.

$$S \left[\frac{\text{mV}}{\text{Pa}} \right] = 10^{\frac{S \left[\text{dB rel. } \frac{1 \text{ V}}{\text{Pa}} \right]}{20}} \cdot 1000 \quad (3.21)$$

$$S \left[\text{dB rel. } \frac{1 \text{ V}}{\text{Pa}} \right] = 20 \cdot \lg \left(S \left[\frac{\text{mV}}{\text{Pa}} \right] \right) \quad (3.22)$$

Die Bestimmung der Empfindlichkeit der Mikrofonkapsel erfolgt mit Hilfe eines geeichten Kalibrators. Die EMK wird dabei einem Sinuston der Frequenz 1 kHz mit einem Schalldruckpegel von 94 dB ausgesetzt und die resultierende Empfindlichkeit aus dem Analysator ausgelesen.

Die sich bei verschiedenen großen R_V ergebenden Empfindlichkeiten der EMK K2 sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. Man erkennt, dass sich die Empfindlichkeit der Elektretmikrofon-Kapsel mit zunehmendem R_V erhöht.

Tabelle 3.2: Empfindlichkeiten S der Elektretmikrofon-Kapsel K2 in Abhängigkeit von R_V

R_V [k Ω]	S [mV/Pa]
2,2	10,3
2,7	12,2
3,2	13,7
4,7	18,2

Frequenzgang

Der Frequenzgang, dessen theoretischer Verlauf unter 3.1 erläutert wurde, gibt Aufschluss über die Linearität der Mikrofonkapsel. Der gemessene Signalpegel sollte dabei über dem gesamten ausgewiesenen Frequenzbereich eine lineare Funktion des Schalldruckpegels darstellen. Zur Bestimmung des Frequenzgangs wird eine Druckkammer (siehe: Anhang B) verwendet, welche die jeweilige Mikrofonkapsel über ein eingeschlossenes Luftvolumen mit dem Referenzmikrofon koppelt (Abbildung 3.15). Als Referenzmikrofon kommt ein Microtech Gefell M360 mit der Nr. 1881 zum Einsatz.

Als Messsignal wird weißes Rauschen mit der Bandbreite 1 Hz bis 20 kHz genutzt, welches vom im Analysator integrierten Signalgenerator erzeugt und über einen Sony Ericsson InEar Kopfhörer der Druckkammer zugeführt wird. Das vom Referenzmikrofon und der untersuchten Mikrofonkapsel gelieferte Signal wird mit dem Analysator SINUS HARMONIE® aufgezeichnet und das Spektrum der Übertragungsfunktion gebildet. Das mit dem Frequenzgang des Referenzmikrofon korrigierte Amplitudenspektrum der Übertragungsfunktion wird als Frequenzgang bezeichnet. Durch die Korrektur erhält man ein vom Frequenzgang des Referenzmikrofons unabhängigen Frequenzgang der

EMK. Der Frequenzgang des MircoTech Gefell M360 Nr. 1881 wurde von Seiten des Herstellers dem Mikrofon beigelegt.

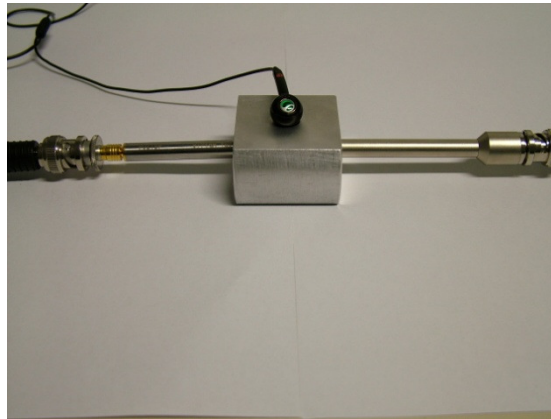


Abbildung 3.15: Druckkammer mit BSWA-Tech MPA416, Microtech Gefell M360 Nr. 1881 (Referenz) und Kopfhörer

Der Einfluss des R_V auf den Frequenzgang der EMK zeigt sich besonders im hochfrequenten Bereich über 10 kHz, wo ein starkes Absinken des Frequenzgangs bzw. eine Abnahme der Empfindlichkeit für Frequenzen dieses Bereiches ersichtlich wird (siehe Abbildung 3.16). Die Kabellänge wird bei der Ermittlung des Frequenzgangs konstant gehalten, da auch sie einen Einfluss auf das Übertragungsverhalten bzw. den Frequenzgang hat (siehe: *Übertragungsverhalten bei großen Kabellängen*)

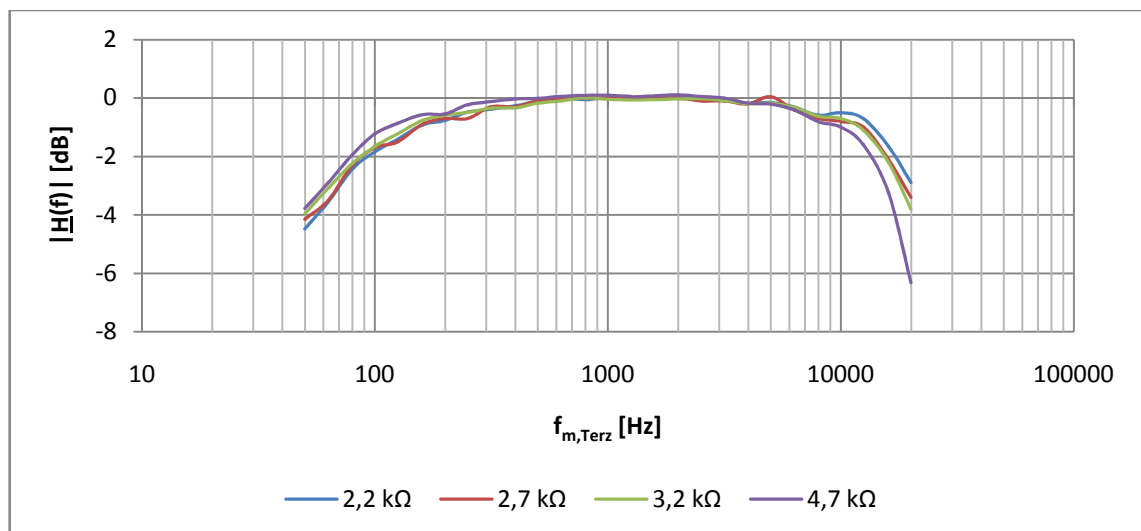


Abbildung 3.16: Einfluss von R_V auf den Frequenzgang der Elektretmikrofon-Kapsel K2

Klirrfaktor

Der frequenzabhängige Klirrfaktor k ist ein Maß für nichtlineare harmonische Verzerrungen. Er gibt an, in welchem Maß einem sinusförmigen Eingangssignal, durch nichtlineare Verzerrungen, harmonische Oberschwingungen hinzugefügt werden. Nichtlineare harmonische Verzerrungen entstehen durch Spiegelung oder Abschneiden des Eingangssignals an Kennlinien von passiven und aktiven Halbleiterbauelementen (Abbildung 3.17).

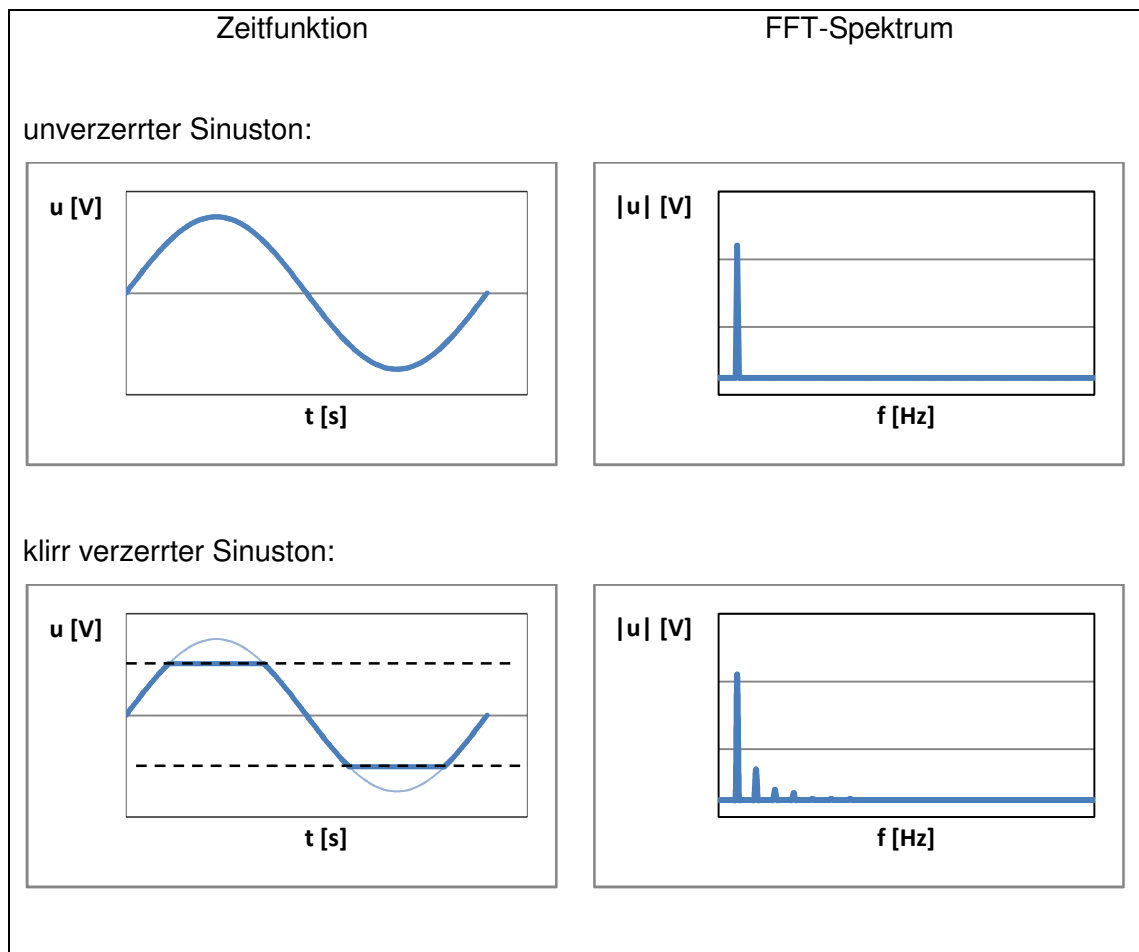


Abbildung 3.17: Einfluss von nichtlinearen Verzerrungen auf das FFT-Spektrum

Auch der englische Ausdruck THD, Total Harmonic Distortion, ist für die Bezeichnung des Klirrfaktors üblich. Jedoch unterscheiden sich beide in ihrer Berechnung. Während sich der Klirrfaktor aus dem Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Effektivwert aller Oberschwingungen plus der Grundschwingung berechnet, ergibt sich der THD aus dem Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Effektivwert der Grundschwingung. Beide Berechnungen liefern bis zu einem Klirrfaktor $k < 5\%$ identische Werte.

Klirrfaktor:

$$k = \sqrt{\frac{u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2}} \cdot 100 [\%] \quad (3.23)$$

THD:

$$k = \sqrt{\frac{u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2}{u_1^2}} \cdot 100 [\%] \quad (3.24)$$

Dabei kennzeichnet u_1 die Signalspannung der Erregerfrequenz und u_2 bis u_n die elektrische Spannung ihrer harmonischen Vielfachen am Mikrofonausgang.

Aus dem Klirrfaktor bei $f = 1$ kHz lässt sich der maximal zulässige Schalldruckpegel für die Mikrofonkapsel bestimmen und somit die obere Grenze des Dynamikbereiches dieser Mikrofonkapseln angeben.

Nach DIN EN 61094 Teil 1 wird der maximal zulässige Schalldruckpegel für ein Laboratoriums-Normalmikrofon bei einem Klirrfaktor von 1 % und bei niedrigen Frequenzen bestimmt. Üblich ist hierbei eine Frequenz von $f = 1$ kHz. Für ein Gebrauchsnormalmikrofon wird der maximal zulässige Schalldruckpegel nach DIN EN 61094 Teil 4 bei einem Klirrfaktor von 3 % angegeben. Ein Laboratoriums-Normalmikrofon ist ein Kondensatormikrofon, welches besonders strengen Anforderungen an geometrische Maße und elektroakustische Eigenschaften entspricht, besonders in Hinsicht auf Langzeitstabilität und in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen [8]. Ein Gebrauchsnormalmikrofon ist ein Mikrofon, das in einem Messsystem zur Bestimmung des Schalldruckes verwendet wird. Das Wandlerprinzip, nach welchem dieses Mikrofon arbeitet, ist dabei nicht von Bedeutung [10].

Für die Ermittlung des maximalen Schalldruckpegels soll im Weiteren der Klirrfaktor $k = 3$ % genutzt werden.

Zur Ermittlung des Klirrfaktors wird die Mikrofonkapsel mit einem sinusförmigen Ton der Frequenz 1 kHz in der einseitig schallhart verschlossenen Druckkammer angeregt und mittels einer FFT-Analyse der von der Mikrofonkapsel abgegebenen effektiven Spannung aufgezeichnet. Die Spannungen u_1 bis u_n werden aus den Linien des FFT-Spektrums für die Erregerfrequenz und ihrer ganzzahligen Vielfachen ausgelesen. Dabei werden nicht nur die Linien der jeweiligen Frequenz, sondern auch die zwei direkt benachbarten Linien berücksichtigt. Aus der ermittelten elektrischen Spannung der Erregerfrequenz und der

elektrischen Spannungen der harmonischen Oberschwingungen wird nach Gleichung (3.23) der Klirrfaktor berechnet.

Der Schalldruckpegel des Sinussignals in der Druckkammer wird über die Aussteuerung des verwendeten Signalgenerators in einer Abstufung von -5 dBFS variiert. Die Signalpegelstärke bezieht sich auf den größtmöglichen Signalpegel, der Vollaussteuerung von 0 dBFS. Diese entspricht bei der Frequenz von 1 kHz einem Schalldruckpegel von 120 dB.

Am Beispiel der Mikrofonkapsel K2 soll die Ermittlung des Klirrfaktors $k = 3\%$ bei Verwendung von einem $R_V = 2,2\text{ k}\Omega$ kurz dargestellt werden.

Der Klirrfaktor wird für eine Pegelaussteuerung von 0 dBFS bis -25 dBFS nach Gleichung (3.23) ermittelt. Für die Bestimmung des maximal zulässigen Schalldruckpegels, bei dem die Mikrofonkapsel einen Klirrfaktor von 3 % aufweist, gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen kann man den Schalldruckpegel graphisch bestimmen. Dies setzt jedoch voraus, dass das Mikrofon bei Vollaussteuerung des Signalgenerators (0dBFS) einen höheren Klirrfaktor als 3 % besitzt. Andererseits besteht die Möglichkeit der rechnerischen Ermittlung über die Bildung der Regressionsfunktion.

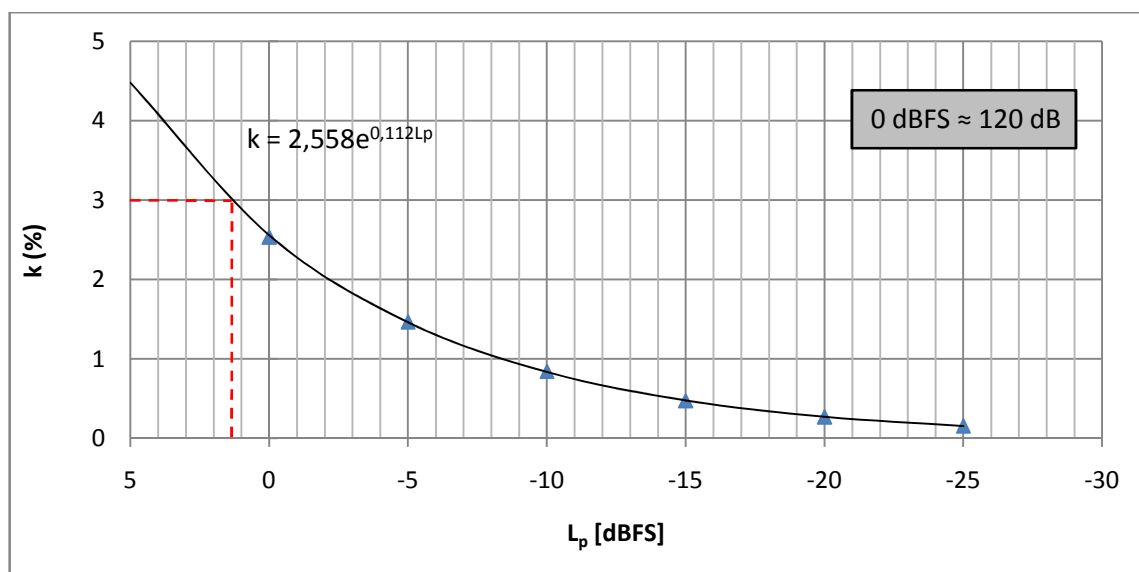


Abbildung 3.18: Darstellung ermittelter Klirrfaktoren und der zugehörigen Regressionsfunktion der EMK K2

Nach Umstellen der in Abbildung 3.18 gegebenen exponentiellen Regressionsfunktion ergibt sich für den Klirrfaktor $k = 3\%$ ein Schalldruckpegel von 1,4 dBFS bzw. 121,4 dB

In Abbildung 3.19 ist der Einfluss von R_V auf den Klirrfaktor dargestellt. Dieser sinkt mit steigendem R_V bei konstantem Anregungsschalldruckpegel.

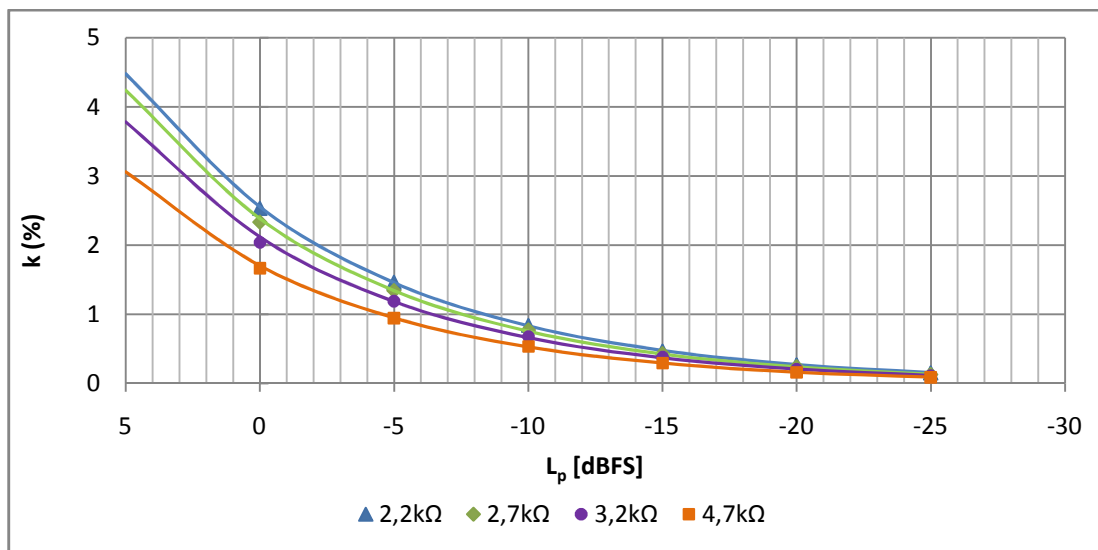


Abbildung 3.19: Einfluss von R_V auf den Klirrfaktor der EMK K2

Der aus dem Schalldruckpegel bei $k = 3\%$ resultierende maximal zulässige Schalldruckpegel ist in Tabelle 3.3 aufgeführt.

Mit der Größe des ausgewählten R_V ist eine Erhöhung des maximalen Schalldruckpegels von ca. 3,5 dB möglich. Dies entspricht einem nach oben hin erweiterten Dynamikbereich.

Tabelle 3.3: Einfluss von R_V auf den maximalen Schalldruckpegel

R_V [kΩ]	Maximaler Schalldruckpegel bei $k_{1\text{kHz}}=3\%$ [dB]
2,2	121,4
2,7	122,0
3,2	123,0
4,7	124,8

Äquivalenter Schalldruckpegel

Der äquivalente Schalldruckpegel $L_{p,Rausch}$ (engl. Inherent Noise) ist ein Messwert, der die Hörbarkeit des Mikrofonrauschens bewertet. Dabei spielt nicht nur die vom Mikrofon abgegebene Rauschspannung eine Rolle, sondern auch die Mikrofonempfindlichkeit. Besitzt die Mikrofonkapsel eine hohe Empfindlichkeit, so ist das Nutzsignal im Verhältnis zum Störsignal sehr groß. Eine solche Mikrofonkapsel hat im Vergleich zu einer weniger empfindlichen Mikrofonkapsel, mit gleicher Rauschspannung, einen geringeren äquivalenten Schalldruckpegel.

Ein Maß für die subjektive Stärke des Rauschens erhält man, indem man eine hypothetische Schallquelle vor dem Mikrofon annimmt, welche das Rauschsignal emittiert. Den Wert des äquivalenten Schalldruckpegels erhält man aus dem Verhältnis der (bewerteten) gemessenen Rauschspannung $u_{Rausch,bewertet}$ zu der Empfindlichkeit des Mikrofons und der Umrechnung dieses hypothetischen Schalldrucks in einen Pegel.

$$L_{p,Rausch} = 20 \cdot \lg \left(\frac{u_{Rausch,bewertet}}{S} \cdot \frac{1}{p_0} \right) [dB(bewertet)] \quad (3.25)$$

In der DIN EN 61672 Teil 1 wird für einen Schallpegelmesser die Angabe des äquivalenten Schalldruckpegels für jeden ihm zur Verfügung stehenden Bewertungsfilter vorgeschrieben. Für Messmikrofone hingegen ist keine explizite Vorschrift zu finden. Bei den Herstellern von Messmikrofonen hat sich jedoch der A-Bewertungsfilter für die Angabe des äquivalenten Schalldruckpegels etabliert. Die Messung der Rauschspannung erfolgt durch eine Spitzenwertmessung.

Zur Ermittlung der dargestellten Werte werden der A-Bewertungsfilter und die Messung des Maximalwerts der Rauschspannung herangezogen.

Auf Grund der sich mit steigendem R_V erhöhenden Empfindlichkeit und der Kenntnis, des in Gleichung (3.25) aufgezeigten Zusammenhangs zwischen Empfindlichkeit und äquivalentem Schalldruckpegel, ist grundsätzlich ein Absinken des äquivalenten Schalldruckpegels zu erwarten. Diese Erwartung würde aber nur dann real auftreten, wenn das Rauschen des Impedanzwandlers nicht maßgeblich für die Gesamtrauschspannung der Mikrofonkapsel verantwortlich ist. Wie man in Abbildung 3.20 erkennt, trifft der erwartete Einfluss des R_V auf den äquivalenten Schalldruckpegel zu und seine Werte sinken, wenn auch nur in geringem Rahmen. Somit wird eine Erweiterung der unteren Grenze des Dynamikbereiches erreicht.

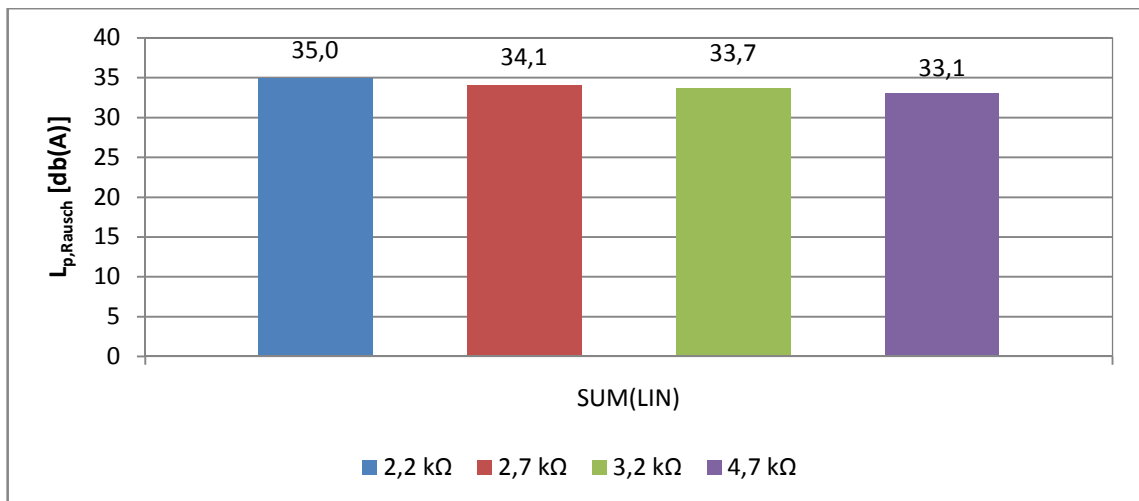


Abbildung 3.20: Einfluss von R_V auf den äquivalenten Schalldruckpegel $L_{p,Rausch}$ der EMK K2

Einfluss auf das Übertragungsverhalten bei großen Kabellängen

Abschließend soll der Einfluss des R_V auf das Übertragungsverhalten bei großen Kabellängen untersucht werden. Da im späteren Arbeitsumfeld des Arrays Kabellängen von 10 m bis 20 m angestrebt werden. Dieser Untersuchung liegt als Basiswert der Frequenzgang der EMK- R_V -Kombination bei einer Kabellänge von 0,5 m zu Grunde. Der für den einzelnen R_V in Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22 aufgezeigten Einfluss auf das kabellängenabhängige Übertragungsverhalten ist also frei vom bereits ermittelten Einfluss des R_V auf den Frequenzgang (siehe: *Frequenzgang*). Für große R_V ist in hohen Frequenzen eine zunehmende Abweichung vom linearen Frequenzgang zu erkennen. Diese Abweichung ist für eine Kabellänge von 20 m wesentlich stärker ausgeprägt als bei einer Kabellänge von 10 m.

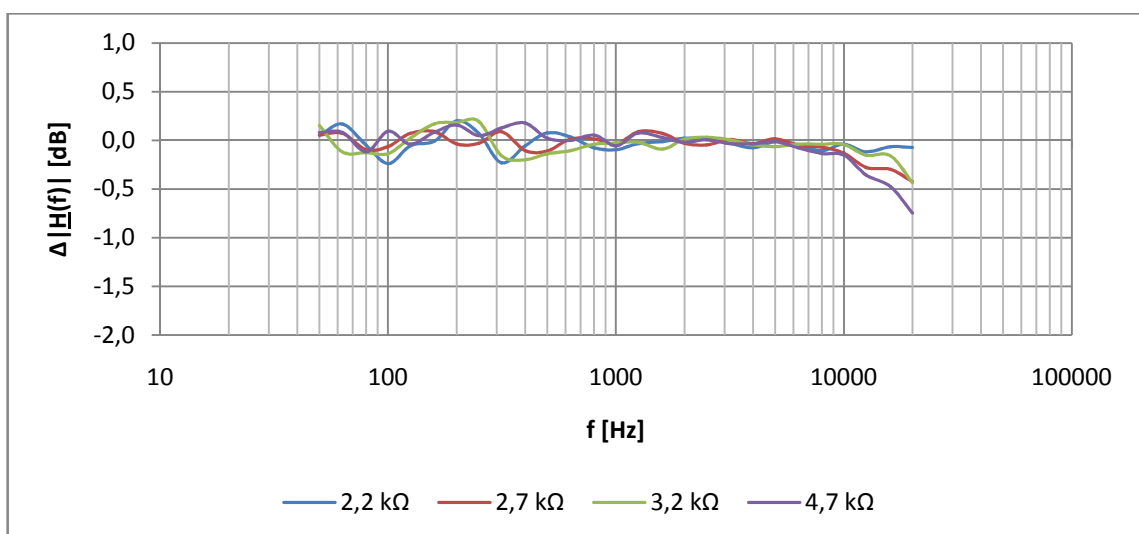


Abbildung 3.21: Einfluss von R_V auf das Übertragungsverhalten bei 10 m Kabellänge

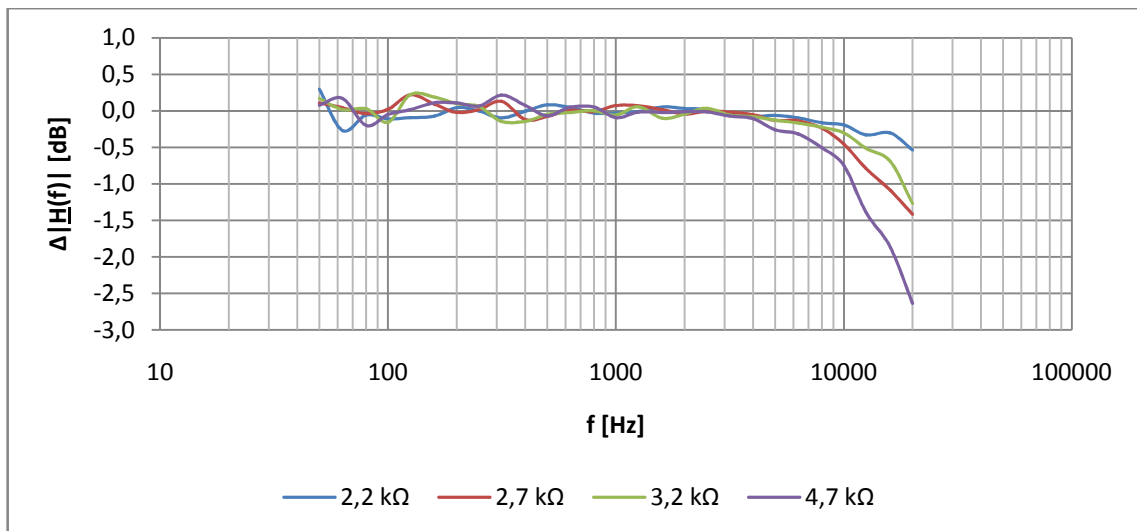


Abbildung 3.22: Einfluss von R_V auf das Übertragungsverhalten bei 20 m Kabellänge

Auswahl des R_V

Auf Grund des negativen Einflusses von R_V auf die Linearität des Frequenzgangs bei hohen Frequenzen, die sich bei großen Kabellängen im hochfrequenten Bereich zusätzlich verschlechtert, wird ein R_V von 2,2 k Ω für die Untersuchung der Mikrofonkapseln in Abschnitt 3.3 sowie der späteren elektrischen Konstruktion gewählt. Obwohl sich mit steigendem R_V der Dynamikbereich der Mikrofonkapsel erweitert, ist der linearen Übertragung des Schalldruckpegels in einen Signalpegel, bei einer angestrebten Kabellänge zwischen 10 m und 20 m, das Hauptaugenmerk zu widmen.

3.3 Gegenüberstellung der Mikrofonkapseln

In diesem Kapitel sollen vier verschiedene Elektretmikrofon-Kapseln messtechnisch auf ihre Eigenschaften und den möglichen Einsatz im Mikrofonarray untersucht werden (siehe Tabelle 3.4). Bei der EMK K4 handelt es sich um eine Back-Elektretmikrofon-Kapsel. Zu der EMK K1 und K3 sowie der aus einer Mikrofon-Verstärkereinheit entnommenen EMK K2 ist von Herstellerseite aus keine Angabe zur Bauart vorhanden. Die untersuchten Elektretmikrofon-Kapseln sind in Abbildung 3.23 abgebildet.

Um ein Gefühl für die im Folgenden messtechnisch erfassten Eigenschaften der Mikrofonkapseln zu erhalten, werden herkömmliche Messmikrofone der Firmen Microtech Gefell und BSWA-Tech mit in die Bestimmung der Eigenschaften einbezogen. Bei den beiden Messmikrofonen, dem Microtech Gefell M360 und dem BSWA-Tech MPA416, handelt es sich um stromgespeiste Elektretmikrofone.

Am Ende dieses Kapitels werden die untersuchten Eigenschaften aller Mikrofonkapseln tabellarisch dargestellt und miteinander verglichen, um schließlich die Mikrofonkapsel mit den, für den Einsatz im Array, günstigsten Eigenschaften auszuwählen.

Tabelle 3.4: Übersicht der untersuchten Elektretmikrofon-Kapseln

Kapselbezeichnung	Produktbezeichnung – Hersteller/Vertrieb
K1	EMY-63M/P - Conrad
K2	AU 20 - Hanse
K3	POM-2738P-R - project unlimited
K4	MW61A - Panasonic

Zur Bestimmung des Frequenzgangs sowie des Klirrfaktors kommt eine Druckkammer zum Einsatz, deren Abmaß und Eigenfrequenz in Anhang B aufgeführt werden. Als Grundlage für die Dimensionierung der Druckkammer wurde auf die in [18] verwendete Druckkammer zurückgegriffen und an die Durchmesser der EMK angepasst. Desweiteren wurden auch konstruktive Veränderungen an der Druckkammer vorgenommen um eine sehr hohe Resonanzfrequenz zu erhalten. Diese liegt für die EMK-Untersuchungen bei ca. 19,2 kHz.

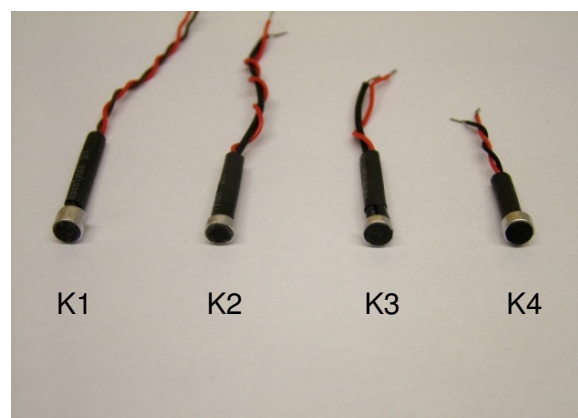


Abbildung 3.23: Abbildung der untersuchten EMK

Die Verfahrensweise zur Ermittlung der Mikrofoneigenschaften wurde in Abschnitt 3.2.2 bereits vorgestellt. In diesem Abschnitt werden lediglich die Ergebnisse der Untersuchung für die einzelnen Elektretmikrofon-Kapseln dargestellt.

Empfindlichkeit

Die Tabelle 3.5 zeigt die Empfindlichkeiten S der verschiedenen Mikrofonkapseln und der beiden Messmikrofone.

Für die EMK K1, K2 und K3 sowie für das Messmikrofon Mikrotech Gefell M360 ermittelten Empfindlichkeiten sind annähernd gleich groß. Ihre Werte liegen zwischen 10,3 mV/Pa für K1 und 12,6 mV/Pa für K3. Die EMK K4 zeichnet sich durch eine um ca. 5 mV/Pa höhere Empfindlichkeit aus. Sie beträgt 17 mV/Pa. Das Mikrofon BSWA-Tech MPA416 besitzt mit einer Empfindlichkeit von 46,8 mV/Pa gegenüber den Mikrofonkapseln sowie dem Mikrofon Mikrotech Gefell M360 eine um ein Vielfaches höhere Empfindlichkeit.

Tabelle 3.5: Ergebnis der Empfindlichkeitsbestimmung der Mikrofonkapseln

Mikrofonkapsel	S [mV/Pa]
K1	11,0
K2	10,3
K3	12,6
K4	17,0
Messmikrofon	
Mikrotech Gefell M360	12,2
BSWA-Tech MPA416	46,8

Frequenzgang

Um ein Maß für die Linearität des ermittelten Frequenzgangs zu besitzen, wird die in DIN EN 62672 Teil 1 [12] genutzte zulässige Grenzabweichung für die Mikrofonklasse 1 als Qualitätskriterium herangezogen. Ein idealer Frequenzgang ist ein Amplitudenverlauf, der für den gesamten Frequenzbereich 0 ist.

In Abbildung 3.24 sind die Frequenzgänge der einzelnen Mikrofonkapseln vergleichend dargestellt. Die Mikrofonkapsel K1 weist dabei einen stark verformten Frequenzgang auf, der unterhalb von 300 Hz abfällt und für Frequenzen oberhalb von 4 kHz über die als Qualitätskriterium herangezogene Grenzabweichung hinaus ansteigt. Für den Frequenzbereich von 200 Hz bis 7 kHz besitzt die EMK K2 einen linearen Frequenzgang, dessen

maximale Abweichung zu dem idealen Frequenzgang nicht größer als 1 dB ist. Außerhalb dieses Frequenzbereiches fallen die Amplituden jedoch stark ab. Für die Mikrofonkapsel K3 erkennt man einen sich aus dem tiefen Frequenzbereich bis 4 kHz erstreckenden linearen Frequenzgang, welcher oberhalb von 4 kHz ähnlich dem Verhalten der Mikrofonkapsel K1 über die Grenزابweichung hinaus ansteigt und zu höheren Frequenzen wieder abfällt. Die Mikrofonkapsel K4 besitzt einen besonders linearen Frequenzgang für den Frequenzbereich von 50 Hz bis 16 kHz. Der Frequenzgang weist lediglich in der Terzmittenfrequenz von 20 kHz eine Abweichung vom idealen Frequenzgang größer 1 dB auf.

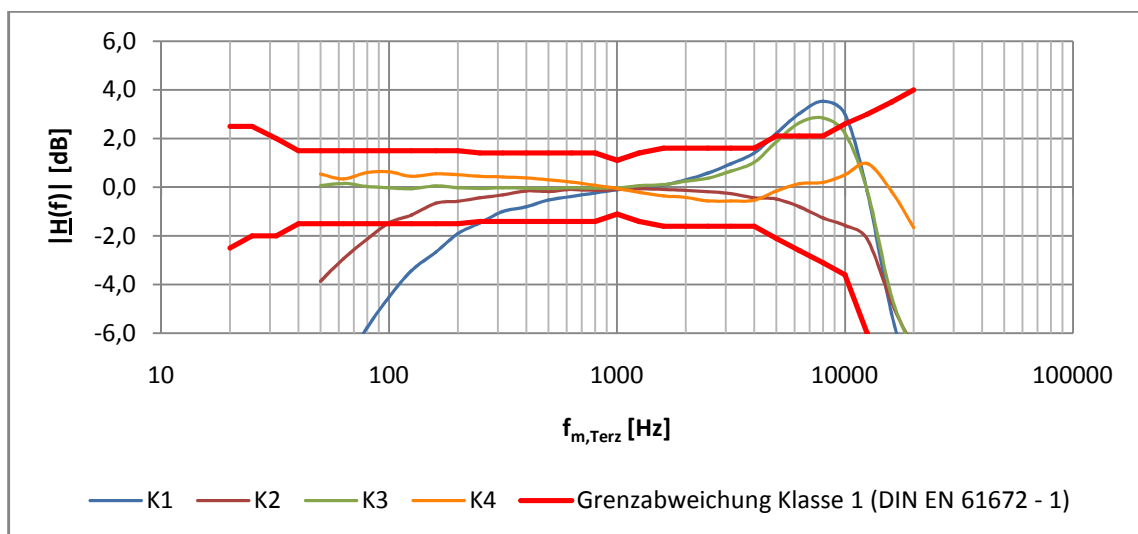


Abbildung 3.24: Frequenzgang der einzelnen Mikrofonkapseln

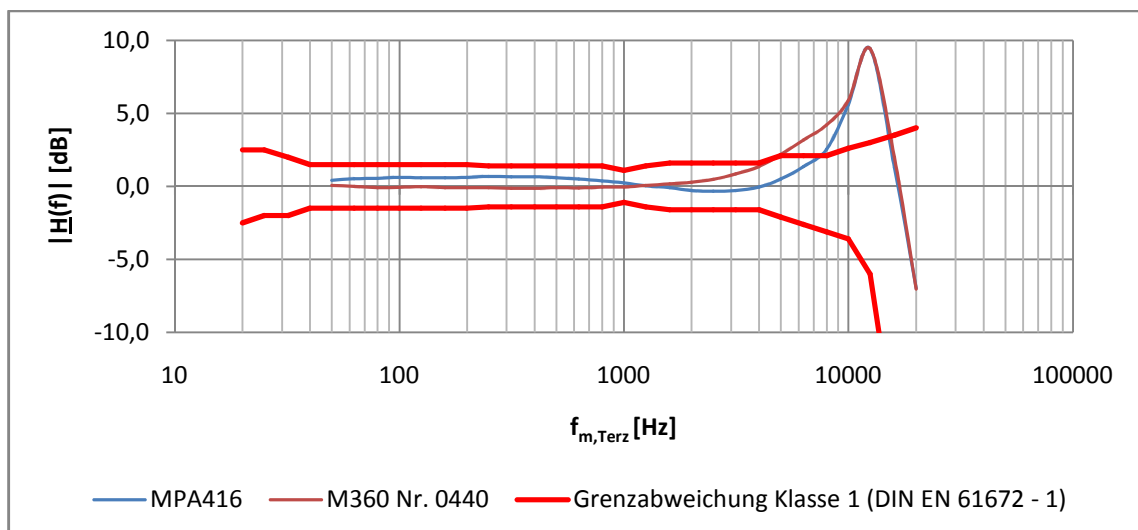


Abbildung 3.25: Frequenzgang Microtech Gefell M360 Nr. 0440 und BSWA-Tech MPA416

Die Druckkammer zur Messung des Frequenzgangs ist auf Grund ihrer Bauart nicht für die Frequenzgangmessung der Messmikrofone geeignet. Diese besitzen einen größeren

Durchmesser als die Mikrofonkapseln und lassen sich nicht weit genug in die Kammer schieben, wodurch sich das Koppelvolumen der Kammer vergrößert und sich die Resonanzfrequenz der Kammer verringert (siehe: Anhang B). Das Ergebnis dieser Messung wird in Abbildung 3.25 gezeigt.

Klirrfaktor

Der Klirrfaktor, dessen Ermittlung am Beispiel der EMK K2 in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wird, ist für die Bestimmung der oberen Begrenzung des Dynamikbereiches verantwortlich. Diese wird über den maximal zulässigen Schalldruckpegel angegeben. Im Folgenden sollen die aus dem Klirrfaktor $k = 3\%$ resultierenden maximalen Schalldruckpegel der verschiedenen EMK-Typen tabellarisch dargestellt werden.

Die in Tabelle 3.6 aufgeführten Werte des maximalen Schalldruckpegels sind aus dem rechnerisch ermittelten Klirrfaktor bestimmt worden. Nach DIN EN 61094 Teil 4 wird die obere Grenze des Dynamikbereichs bei einem Klirrfaktor $k = 3\%$ angegeben.

Verwendet man hingegen den Klirrfaktor $k = 1\%$ für das Laboratoriums-Normalmikrofon aus DIN EN 62094 Teil 1, so ergeben sich um ca. 10 dB niedrigere Werte.

Tabelle 3.6: Übersicht maximaler Schalldruckpegel bei $k=1\%$ und $k=3\%$

Mikrofonkapsel	maximaler Schalldruckpegel bei $k_{1\text{kHz}} = 1\%$ [dB]	maximaler Schalldruckpegel bei $k_{1\text{kHz}} = 3\%$ [dB]
K1	105	115
K2	111	121
K3	106	115
K4	104	114
Messmikrofon		
Microtech Gefell M360	126	134
BSWA-Tech MPA416	113	129

Die EMK K1, K3 und K4 zeigen einen wesentlich geringeren maximal zulässigen Schalldruckpegel als die kommerziellen Messmikrofone. Lediglich die EMK K2 erreicht mit ihren

Werten annähernd die Größenordnung des Mikrofons BSWA-Tech MPA416, das den geringsten maximal zulässigen Schalldruckpegel der beiden Messmikrofone aufweist.

Äquivalenter Schalldruckpegel

Bei der Betrachtung der A-bewerteten Terzpegelverläufe der einzelnen EMK fallen Gemeinsamkeiten auf (siehe Abbildung 3.26). So zeigen alle untersuchten Elektretkapseln im Terzband 125 Hz und 16 kHz signifikante Maxima. Je nach Kapseltyp sind weitere kleine Maxima in einzelnen Terzen zu erkennen. Besonders zu erwähnen ist die Mikrofonskapsel K4, welche sehr niedrige Terzpegel über den gesamten Frequenzbereich und nur geringe Maxima außerhalb der bereits erwähnten signifikanten Terzen aufweist. Teilweise liegen ihre Terzpegel bis zu 3,5 dB(A) unterhalb des rauschärmsten Messmikrofons BSWA-Tech M416, welches besonders durch einen sehr starken Rauschpegelanstieg im Bereich von 3 kHz auffällt. Vergleicht man die EMK mit den Messmikrofonen, so weisen die Messmikrofone ebenfalls einen signifikanten Pegelanstieg im Terzband von 125 Hz auf. Das Maxima bei 16 kHz fehlt allerdings bei den Messmikrofonen.

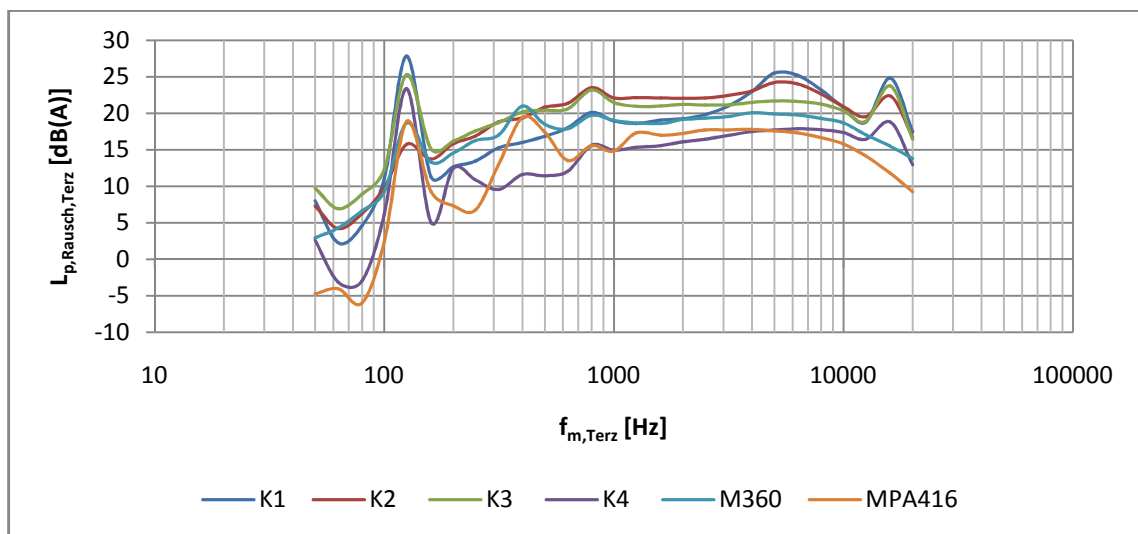


Abbildung 3.26: A-bewertetes Terzspektrum des äquivalenten Schalldruckpegels für K1 bis K4, sowie der Mikrofone Microtech Gefell M360 und BSWA-Tech MPA416

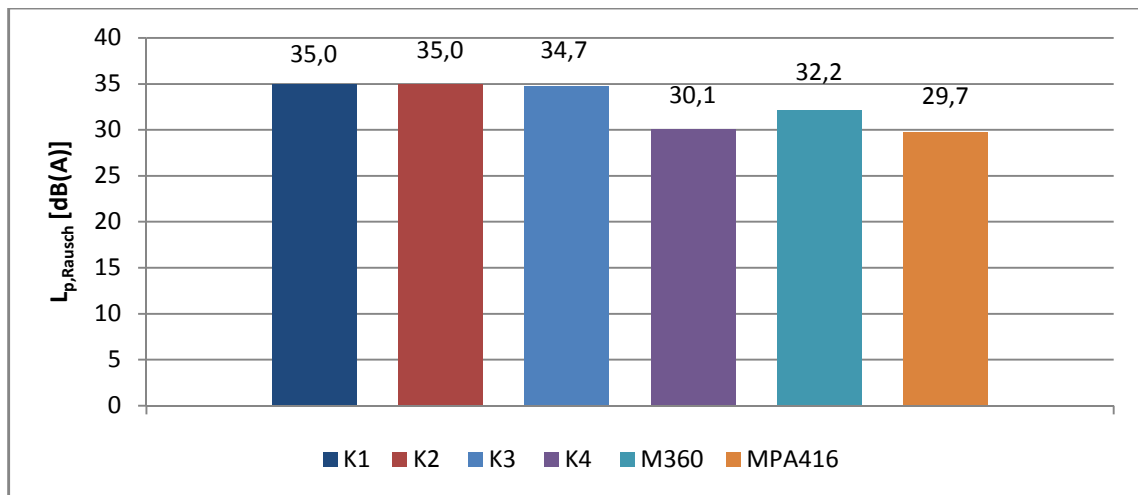


Abbildung 3.27: A-bewerteter Summenpegel des äquivalenten Schalldruckpegels

Die A-bewerteten Summenpegel in Abbildung 3.27 zeigen deutlich die in den Terzpegeln beschriebene Besonderheit der Mikrofonkapsel K4, welche sich hier signifikant von den anderen Mikrofonkapseln in ihrem Summenpegel unterscheidet und mit ihrem Wert in der Größenordnung der Messmikrofone liegt. Ihr Summenpegel liegt dabei ca. 2 dB(A) unter dem Messmikrofon M360 der Firma Microtech Gefell, welches vom Hersteller allerdings mit einem äquivalenten Schalldruckpegel von 35 dB(A) angegeben wird.

Nach der Ermittlung des für die Mikrofonkapsel spezifischen äquivalenten Schalldruckpegels ist es nun möglich den Signal-Rausch-Abstand (SNR) anzugeben.

$$SNR = 94 \text{ dB} - L_{Rausch} \quad [\text{dB}] \quad (3.26)$$

Tabelle 3.7: Ergebnisse der SNR-Bestimmung

Mikrofonkapsel	SNR [dB]
K1	59
K2	59
K3	59
K4	64
Messmikrofon	
Microtech Gefell M360	62
BSWA-Tech MPA416	64

Der SNR ist der Abstand des äquivalenten Schalldruckpegels zu einem Schallsignal der Stärke 1 Pa ($L_p \approx 94$ dB) und ist in Tabelle 3.7 für die einzelnen Elektretmikrofon-Kapseln abgebildet. Diese Angabe wird üblicherweise von den Herstellern der Elektretkapseln, als Alternative zur Nennung des äquivalenten Schalldruckpegels, genutzt.

Wahl der Kapsel

Nachdem die wichtigsten Eigenschaften der vier Mikrofonkapseln untersucht und ausgewertet sind, werden die Ergebnisse tabellarisch gegenübergestellt (siehe Tabelle 3.8).

Die EMK K1 und K3 fallen auf Grund ihres mangelhaft linearen Frequenzgangs aus der weiteren Betrachtung heraus. Die EMK K2 besitzt zwar einen besonders hohen maximal zulässigen Schalldruckpegel, jedoch nur eine geringe Empfindlichkeit und einen, besonders für hohe Frequenzen, mäßig linearen Frequenzgang. Die Entscheidung für den im Array verbauten Mikrofonkapsel-Typ fällt trotz des geringsten maximalen Schalldruckpegels zugunsten der EMK K4, der Panasonic MW61A. Für diesen EMK-Typ spricht vor allem der besonders lineare Frequenzgang und die hohe Empfindlichkeit sowie der geringe Ersatzschallpegel.

Tabelle 3.8: Vergleich der Mikrofonkapseln

	K1	K2	K3	K4
S [mV/Pa]	11,0	10,3	12,6	17,0
Frequenzgang	--	+	-	++
maximaler Schalldruckpegel bei $k = 3\%$ [dB]	115	121	115	114
L_{Rausch} [dB(A)]	35	35	35	30
<p>grün – bester Werte einer Kategorie rot – schlechtester Wert einer Kategorie ++ sehr gut / + gut / - schlecht / -- sehr schlecht</p>				

4 Mechanische Konstruktion des Arrays

Aus dem in der Einleitung beschriebenen Einsatzgebiet und den daraus resultierenden Anforderungen ergeben sich weitere wichtige Konstruktionsmerkmale. Diese sind für ein handgehaltenes Arraysystem in erster Linie die Gewichtsoptimierung sowie die Handhabbarkeit, welche auch im Fahrzeuginnenraum gegeben sein muss. Für die Anforderung nach akustischer „Undurchsichtigkeit“ werden die Mikrofone in eine Grenzfläche integriert, welche die Gewichtsoptimierung beschränkt. Der Anschluss des zu konstruierenden Mikrofonarrays an das Messsystem AcoustiCam[®] bedingt das Einbinden der bereits existierenden Bilderfassungs-Hardware sowie die Kompatibilität der Signalübertragung. Somit ergeben sich folgende Konstruktionsmerkmale:

- Konstruktion als Grenzflächenarray
- geringe Abmaße
- gut positionierter Griff
- Adapter zur Aufnahme der bereits vorhandenen Kamera
- Gewichtsoptimierung der kompletten Konstruktion

4.1 Eigenschaften des Grenzflächenarrays

Auf Grund der im Array verwendeten Kondensatormikrofone und deren typische Kugelcharakteristik, welche nicht zwischen den unterschiedlichen Einfallsrichtungen einer Schallwelle unterscheidet, besitzt ein Mikrofonarray seine typische Richtcharakteristik nicht nur in Blickrichtung, sondern auch in entgegengesetzter Richtung. Somit werden Schallquellen im Rücken eines Arrays ebenfalls wahrgenommen und entsprechend ihrer Position in der tatsächlichen Analyseebene dargestellt. Dies gilt nicht nur für reale Schallquellen, sondern auch für Reflexionen der eigentlichen Schallquelle an Flächen hinter dem Mikrofonarray. Diese Durchsichtigkeit des Mikrofonarrays bedingt die Darstellung von physisch nicht existenten Schallquellen in der Analyseebene. Somit ist beim Einsatz von offenen Mikrofonarrays darauf zu achten, dass sich keine Schallquellen im Rücken dieser befinden.

Um die aus den Schallquellen im Rücken eines Arrays resultierenden, in der Analyseebene dargestellten Quellen zu unterdrücken, wird das Array in eine Grenzfläche integriert. Dies bedeutet, dass die Mikrofone des Arrays bündig in eine Oberfläche eingebaut werden und bewirkt, dass der aus dem Rücken des Arrays einfallende Schall stark gedämpft wird. Damit sind für Messungen mit dem Grenzflächenarray keine schallabsorbierenden Aufbauten hinter dem Array nötig.

Ein ähnliches Prinzip weisen auch Grenzflächen-Mikrofone auf, wenn gleich die Motivation zu deren Konstruktion eine andere ist. Jedoch lassen sich anhand der Eigenschaften dieser Mikrofone Analogien zur Beschreibung der Eigenschaften von Grenzflächenarrays finden. So wird die Veränderung der kugelförmigen Richtcharakteristik von Druckempfängern zu einer nierenförmigen Richtcharakteristik bei tiefen Frequenzen und endlichen Grenzflächen beschrieben. Für hohe Frequenzen oder sehr große Grenzflächen ergibt sich eine halbkugelförmige Richtcharakteristik ([5], [7], [25]). Daraus resultiert für die Richtcharakteristik des Grenzflächenarrays eine starke Dämpfung für rückwärtig einfallenden Schall. Die Richtcharakteristik des Arrays in Blickrichtung bleibt unverändert (Abbildung 4.1).

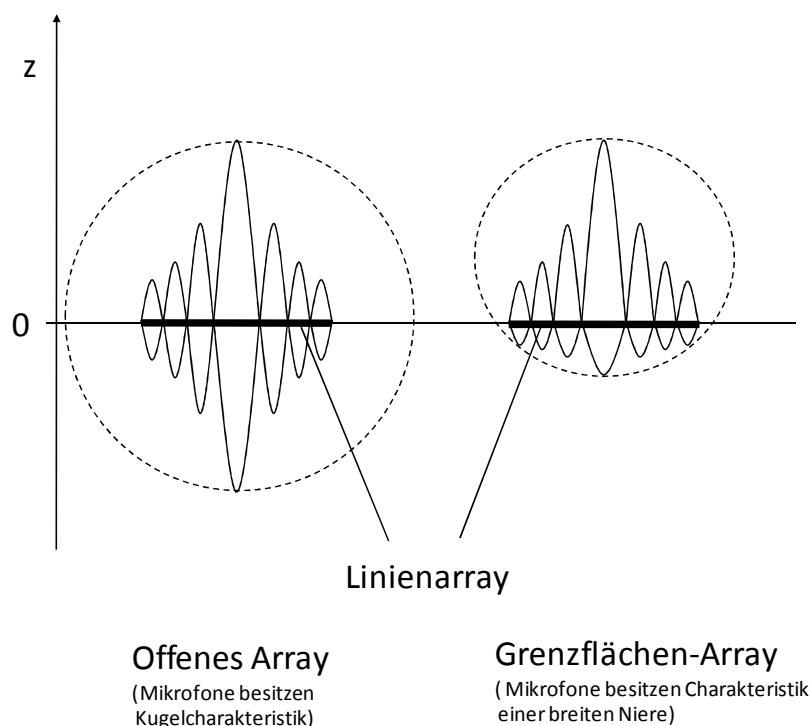


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der veränderten rückwärtigen Richtcharakteristik eines Linienarrays bei tiefen Frequenzen und mit endlicher Grenzfläche (quantitativ)

Eine weitere Besonderheit bei der Verwendung von Grenzflächen-Mikrofonen ist der Druckstauereffekt. Der Druckstauereffekt entsteht bei Reflexion einer Schallwelle an einer Grenzfläche durch das Überlagern von einfallender und reflektierter Schallwelle. Durch Überlagerung der Schalldruckmaxima beider Wellen verdoppelt sich der auf das in die Grenzfläche eingebaute Mikrofon wirkende Schalldruck. Der an diesem Mikrofon gemessene Schalldruckpegel ist also um 6 dB erhöht (siehe Abbildung 4.2). Bedingung für die Reflexion ist eine Ausdehnung der reflektierenden Fläche, die mindestens so groß ist wie die Wellenlänge des zu reflektierenden Schalls [5]. Daraus ergibt sich eine Grenzfrequenz f_g , ab der der Staudruckeffekt auftritt:

$$f_g = \frac{c}{d} \quad (4.1)$$

Wobei d den Durchmesser der Grenzfläche und c die Schallgeschwindigkeit beschreiben.

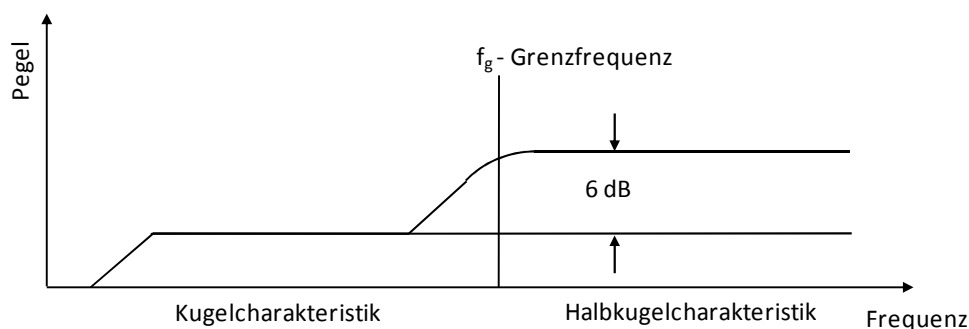


Abbildung 4.2: Auswirkung des Druckstauereffekts auf den Frequenzgang eines Grenzflächenmikrofons [7]

Für ein Mikrofon, das sich mittig im Grenzflächenarray befindet, würde sich mit $d = 0,465$ m eine theoretische Grenzfrequenz von $f_g \approx 740$ Hz ergeben.

4.2 Auslegung der Array-Konstruktion

Die konstruktive Dimensionierung des Grenzflächenarrays erfolgt unter den eingangs dieses Abschnitts beschriebenen Konstruktionsmerkmalen. Dabei soll die komplette elektronische Konstruktion in dem Array Platz finden. Aus dieser Überlegung heraus wird das Array aus einer Frontplatte und einer Rückplatte aufgebaut. Zwischen diesen Platten wird die Elektronik zur IEPE-Konditionierung untergebracht. Die offenen Seiten des Arrays werden aus Gründen der elektrischen Schirmung und dem Schutz vor Staub und Feuchtigkeit verschlossen. In dieses Array wird weiter ein Adapter integriert, welcher die

Kamera des Messsystems AcoustiCam® aufnimmt. Um eine handgehaltene Anwendung des Arrays zu gewährleisten, wird rückseitig ein Griff angebracht. Zusätzlich wird auch eine Halterung konstruiert, die die Verwendung auf einem Stativ ermöglicht.

Array

Die Frontplatte, in welche die Mikrofone bündig eingebaut werden, und die Rückplatte werden aus gewichtsoptimiertem Gesichtspunkt aus 1,5 mm starkem Aluminiumblech gefertigt. Aluminium besitzt nicht nur eine geringe Dichte ($2,7 \text{ g/cm}^3$) und damit ein geringeres Gewicht bei gleicher Konstruktion gegenüber anderen metallischen Werkstoffen, sondern auch eine gute mechanische Bearbeitbarkeit. Desweiteren eignet sich dieser Werkstoff ausgezeichnet für Verfahren der Oberflächenveredelung und eine damit verbundene einfache Farbgebung.

Die Basis der Konstruktion der Frontplatte ist die Mikrofoneometrie des Arrays. Sie ist als eine optimierte Zweikreis-Geometrie gegeben. Dabei werden jeweils 16 Mikrofone auf den zwei, zueinander konzentrischen Kreisen gleichmäßig verteilt. Die der Geometrie zu Grunde liegenden Durchmesser resultieren aus dem angestrebten nutzbaren Frequenzbereich des Arrays. Dieses ist für einen Frequenzbereich von 2000 Hz bis 16000 Hz ausgelegt. Daraus ergeben sich die Durchmesser zu $d_1 = 325 \text{ mm}$ und $d_2 = 123 \text{ mm}$.

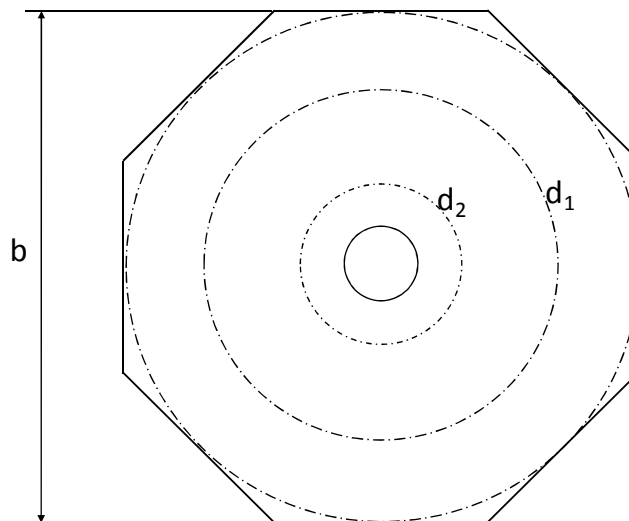


Abbildung 4.3: Frontplatte

Die Form der Front- sowie der Rückplatte ergeben sich aus folgender Überlegung:

Der Abstand zwischen den äußeren Mikrofonen und dem Arrayrand soll mindestens 70 mm betragen. Aus konstruktiven Gründen wird hier als Grundform des Arrays ein gleichmäßiges Achteck mit einer Gesamtbreite $b = 465 \text{ mm}$ gewählt (Abbildung 4.3).

Um den gewünschten Abstand zwischen Front- und Rückplatte zu erhalten und so die elektronische Konstruktion unterbringen zu können, werden bei der Konstruktion der Frontplatte zusätzliche „Flügel“ angesetzt, die durch Abkanten einen, das Array vollständigen umschließenden, Abstandshalter bilden (Abbildung 4.4). In einem dieser Flügel sind zwei Aussparungen enthalten, in die später die Stecker der Datenanbindung eingesetzt werden.

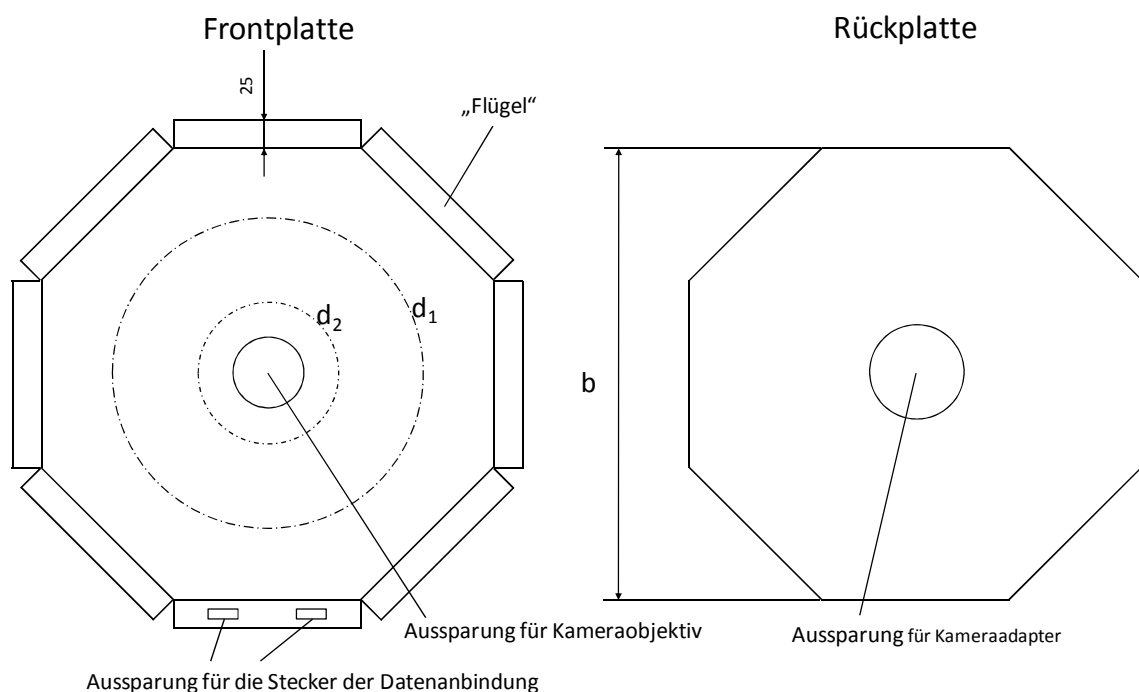


Abbildung 4.4: Front- und Rückplatte

Die Stoßkanten der abgekanteten „Flügel“ werden verschweißt und verschliffen. Die Frontplatte wird mit Hilfe von Winkeln mit der Rückplatte verschraubt. Zusätzlich besitzen beide Platten eine zentrisch in der Arrayfläche befindliche kreisrunde Aussparung für den Kameraadapter.

Die Stecker, die die Anbindung des Arrays an die nachgeschaltete Signalverarbeitung ermöglichen, werden so beschaltet, dass eine separate Nutzung der zwei Einzelkreisgeometrien gewährleistet ist. Die Front- und Rückplatte des gefertigten Grenzflächenarrays sowie dessen Seitenansicht werden in Abbildung 4.5 gezeigt.

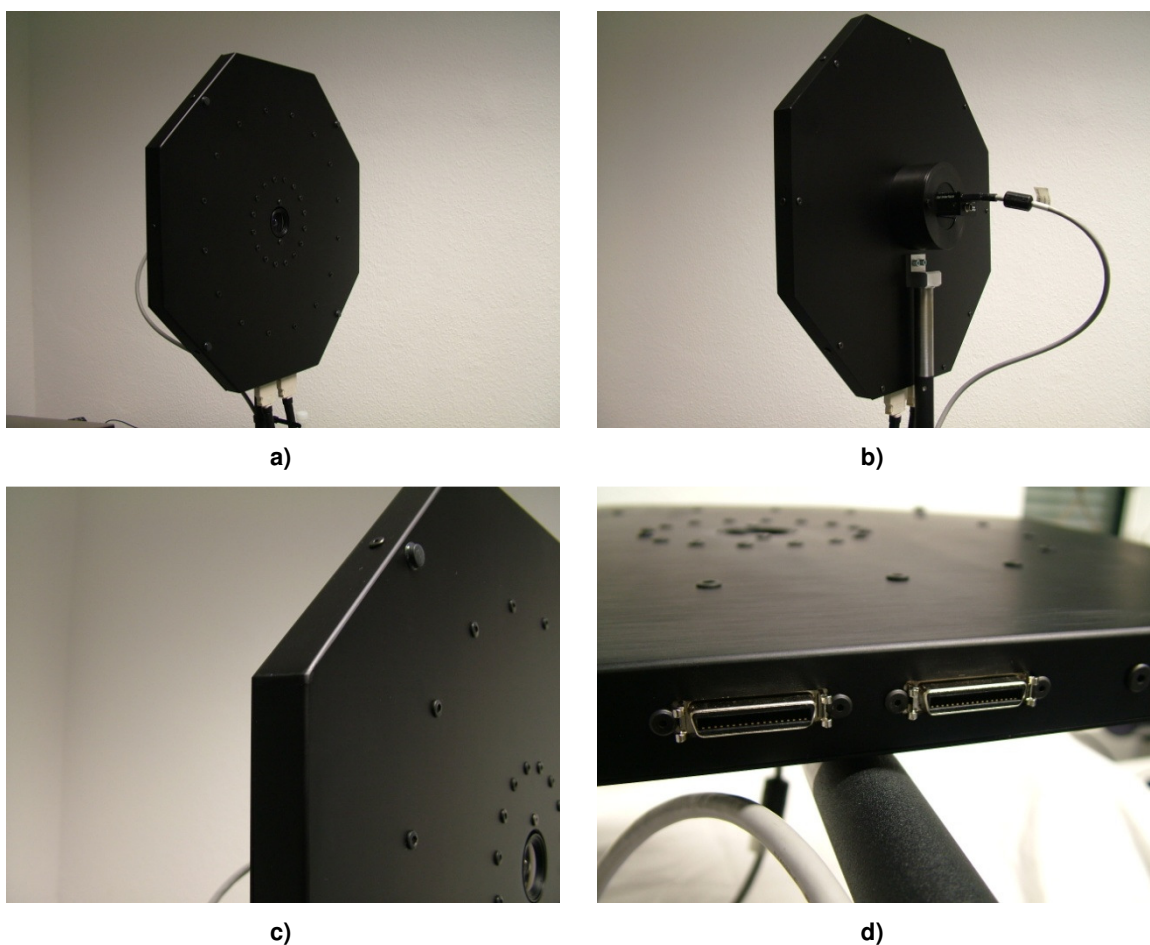


Abbildung 4.5: Front- und Rückansicht des Grenzflächenarrays

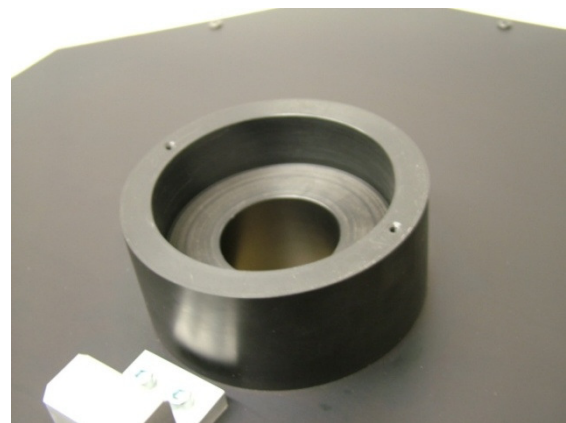
a) Ansicht der Front b) Ansicht der Rückseite c) Seitenansicht (abgekantete „Flügel“ mit verschweißter Stoßkante) d) Ansicht der Unterseite mit eingelassenen Steckern

Kameraadapter

Der Kameraadapter hat zum einen die Aufgabe die Kamera des bestehenden Messsystems aufzunehmen, ohne die an ihr befindliche Halterung (Maske) des ursprünglichen Arrays zu entfernen. Zum anderen gewährleistet der Adapter den bündigen Einbau in die Frontplatte des Arrays. Was wiederum die optimale Überlagerung von Bildinformationen und die aus der Messung erworbenen Schallfeldinformationen ermöglicht. Weiter werden die das Schallfeld beeinflussenden Effekte, die durch Brechung, Beugung und Reflexion an einem vorstehenden Kameraobjektiv entstehen können, vermieden. Das für den Kameraadapter verwendete Material ist POM (Polyoxymethylen), ein teilkristalliner thermoplastischer Kunststoff. Dieser zeichnet sich durch eine geringe Dichte ($1,4 \text{ g/cm}^3$), hohe Festigkeit sowie sehr gute Spanbarkeit aus. Desweiteren ist er in unterschiedlichen Farben und Formen erhältlich. In Abbildung 4.6 sind Bilder der optischen Kamera des bestehenden akustischen Kamerasystems sowie Bilder des Kameraadapters zu sehen.



a)



b)



c)



d)

Abbildung 4.6: Kameraadapter

a) Kamera des bestehenden Messsystems mit Befestigungsmaske b) Kameraadapter des Grenzflächenarrays c) Kameraadapter des Grenzflächenarrays mit Kamera d) bündiger Einbau der Kamera zur Grenzfläche

Griff und Stativhalterung

Der Griff, mit dem das Array gehalten wird (siehe Abbildung 4.7), ist ein Normteil. Es handelt sich hierbei um einen Kunststoffgriff, der in der Industrie zum Öffnen und Schließen von Hauben und Türen eingesetzt wird. Dieser Griff besitzt bereits eine ergonomische Form, was das spätere Halten des Arrays komfortabler gestaltet.

Für eine stationäre Anwendung wurde zusätzlich eine Stativhalterung entworfen (siehe Abbildung 4.8). Der Aufwand zum Wechsel von Griff zu Stativhalterung soll dabei möglichst simpel und schnell erfolgen können. Die Umsetzung dieser Anforderung wird erreicht, indem Griff und Stativhalterung den selben Lochabstand und die Befestigungsschrauben die selbe Gewindeabmessung besitzen.

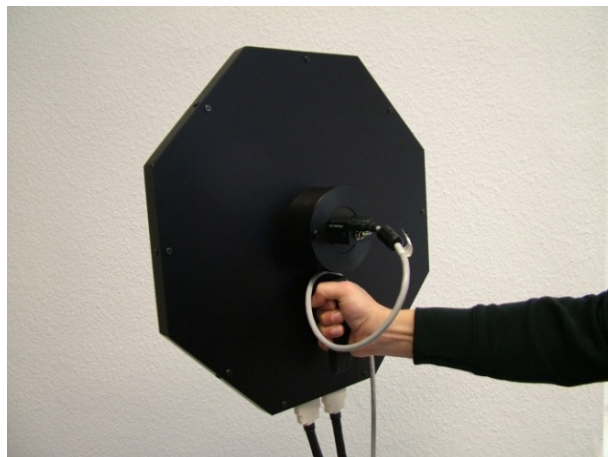


Abbildung 4.7: Handgehaltenes Array



Abbildung 4.8: Stativhalterung des Arrays

Um das gesamte Array optisch aufzuwerten, werden Front- und Rückplatte schwarz eloxiert, der Kameraadapter aus schwarz eingefärbtem POM gefertigt und ein schwarzer Haltegriff gewählt.

Die Einzelteile werden miteinander verschraubt. Für alle sichtbaren Verschraubungen werden spezielle schwarze Innensechskant-Schrauben mit besonders flachen Schraubenköpfen verwendet.

Das Gewicht des fertigen Arrays inklusive der integrierten Elektronik beträgt 2660 g, das der Kamera 298 g. Somit ergibt sich für das handgehaltene Grenzflächenarray ein Gesamtgewicht von 2958 g ohne Kabel.

5 Messtechnische Untersuchungen

Ziel der messtechnischen Untersuchungen ist zum einen das Prüfen der elektrischen und mechanischen Konstruktion auf ihre Funktion und zum anderen die Beurteilung der Eigenschaften des handgehaltenen Grenzflächenarrays in der praktischen Anwendung. Hierzu werden die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Eigenschaften eines Grenzflächenarrays zur Dämpfung von rückwärtig direkt einfallendem Schall sowie die Pegelerhöhung in Folge des Druckstaueffektes untersucht. Anschließend erfolgt eine Messung zur Lokalisierung eines Schlüsselklapperns in einem geschlossenen Fahrzeuginnenraum.

5.1 Messaufbau

Die Abbildung 5.1 zeigt den Aufbau der im Labor stattfindenden Untersuchung auf das Verhalten bei rückwärtig einfallendem Schall. In der Mitte der Abbildung ist das Grenzflächenarray zu erkennen, welches bei dieser Untersuchung stationär auf einem Stativ positioniert wird. Als Messobjekt wird vor dem Array, in 0,75 m Entfernung, eine Druckluftdüse so installiert, dass deren erzeugter Luftstrom nicht auf das Array gelenkt wird, sondern an diesem vorbei strömt. Die Druckluftdüse ist dabei an eine Druckluftversorgung angeschlossen, die einen konstanten Druck liefert. Dadurch wird eine reproduzierbare Schallsituation gewährleistet.

Als Störsignal wird weißes Rauschen verwendet. Dieses wird von einer auf das Array gerichteten Punktschallquelle abgestrahlt, welche im Rücken des Arrays in einer Entfernung von 1 m positioniert ist. Die Lautstärke der Störquelle wird kontinuierlich erhöht um den Einfluss auf die Lokalisierung zu untersuchen. Die Auswertung der Messung erfolgt im 8 kHz Oktavband.

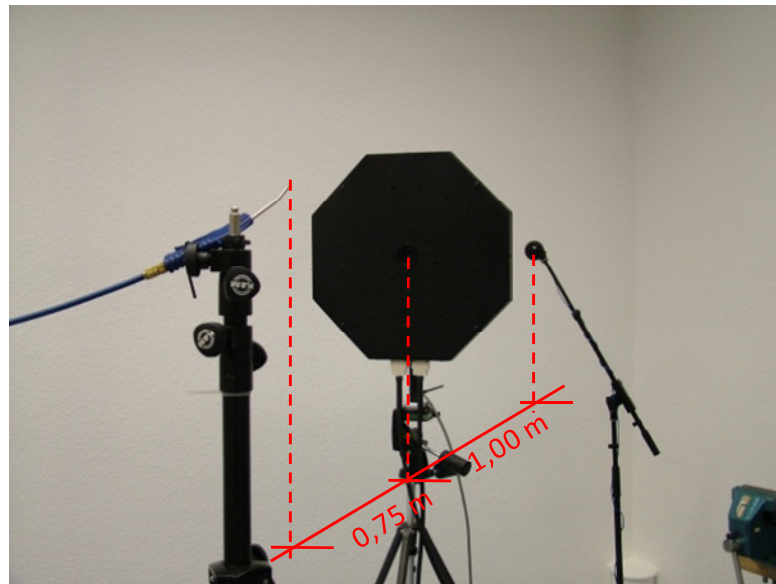


Abbildung 5.1: Messaufbau zur Prüfung des Verhaltens bei rückwärtigem Schalleinfall

In Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 ist die Messsituation der praxisorientierten Messung dargestellt. Es soll ein Schlüsselklappern im geschlossenen Fahrzeuginnenraum bei laufendem Motor lokalisiert werden. Zusätzlich wird eine Störquelle zugeschaltet, welche den Gesamtschallpegel im Inneren des Fahrzeuges erhöht und somit die Lokalisierung des Messobjektes erschweren soll. Das von der Störquelle abgestrahlte Störsignal ist weißes Rauschen. Die spektrale Abstrahlcharakteristik der Störquelle sorgt besonders für eine Anhebung des Innenraumpegels in dem Frequenzbereich der Auswertung. Zusätzlich zur Auswertung im Frequenzbereich, die über eine zeitliche Mittelung der Schallfeldsituation erfolgt, wird eine Quasiechtzeitmessung simuliert. Diese erfolgt im Zeitbereich.



Abbildung 5.2: Messaufbau im Kfz



Abbildung 5.3: Messobjekt (Fahrzeugschlüssel)

Das für die Diplomarbeit konstruierte Grenzflächenarray wird an die bestehende Hardware der AcoustiCam® angeschlossen und die Messungen werden über die zugehörige Software AFD7001 ausgewertet. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 5.4 dargestellt und umfasst folgende Elemente:

- Grenzflächenarray mit 32 Mikrofonen des Typs Panasonic MW61A
- Kamera Sony XCD-V50
- zwei SINUS MSX16 – Module a 16 Kanäle mit einer Auflösung von 16 Bit bei einer Abtastfrequenz von 48 kHz
- Personalcomputer mit installierter Software AFD7001

Das Messsystem AcoustiCam® bietet die Möglichkeit zur Auswertung der Messung im Frequenz- sowie im Zeitbereich. Im Postprocessing-Mode wird im Vorfeld der akustischen Messung ein Bild der zu untersuchenden Messsituation aufgenommen und im Anschluss die Erfassung der Schalldrucksignale durchgeführt. Daraufhin wird ein Zeitausschnitt der Messung ausgewählt, der zur Berechnung dient. Das Ergebnis dieser Berechnung wird mit dem aufgenommenen Bild der optischen Kamera überlagert und dargestellt. Die Ergebnisse der Analyse werden im Frequenzbereich der Lokalisierung und zur Auswertung von spektralen Schallquellenmerkmalen genutzt. Im Zeitbereich erlaubt sie die zeitliche Charakterisierung von Schallquellen. Weiter besitzt die Software einen „Live“-Modus. Dabei handelt es sich um eine Quasiechtzeitanalyse, die im Zeitbereich erfolgt. Dieser Modus dient in erster Linie der Lokalisierung möglicher Schallquellen in

einer unbekannten Messsituation und somit der Vorbereitung einer Messung sowie der direkten Betrachtung der zeitlichen Veränderung des Abstrahlverhaltens.

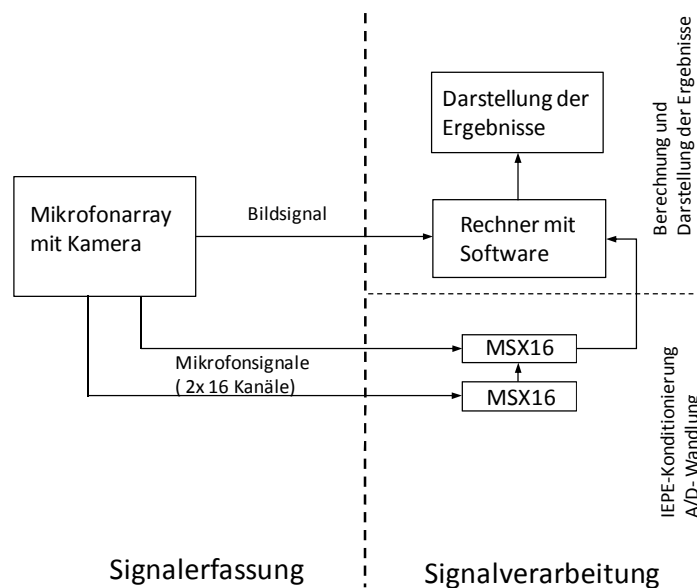


Abbildung 5.4: Schematischer Aufbau des Messsystems AcoustiCam®

5.2 Messergebnisse

Voruntersuchungen

Um die elektrische Konstruktion auf ihre Funktionalität zu testen, werden die Mikrofone auf ihre Empfindlichkeit geprüft. Dies erfolgt zum einen über eine Absolutkalibrierung, bei der alle Mikrofone einzeln kalibriert werden, und zum anderen über eine Relativkalibrierung. Dabei wird ein einzelnes Mikrofon absolut und die verbleibenden mittels weißem Rauschen relativ kalibriert. Die das weiße Rauschen abstrahlende Punktschallquelle wird im Abstand von 0,5 m vor dem Array positioniert. Abbildung 5.5 stellt die Korrekturfaktoren dar, welche sich auf die Empfindlichkeit der Mikrofone bei 94 dB beziehen. Für alle Kanäle ist dabei eine Empfindlichkeit von 17 mV/Pa angenommen und in der Software verankert worden. Negative Korrekturfaktoren bedeuten einen zu hohen Schalldruckpegel der Mikrofone, während positive einen zu niedrigen Schalldruckpegel anzeigen. Die in Abbildung 5.5 aufgeführten Korrekturfaktoren für die beiden Kalibriermethoden zeigen nur geringe Unterschiede. Dabei ist zu beachten, dass für diesen Mikrofontyp Schwankungen zwischen einzelnen Kalibrierungen von < 0,3 dB normal sind.

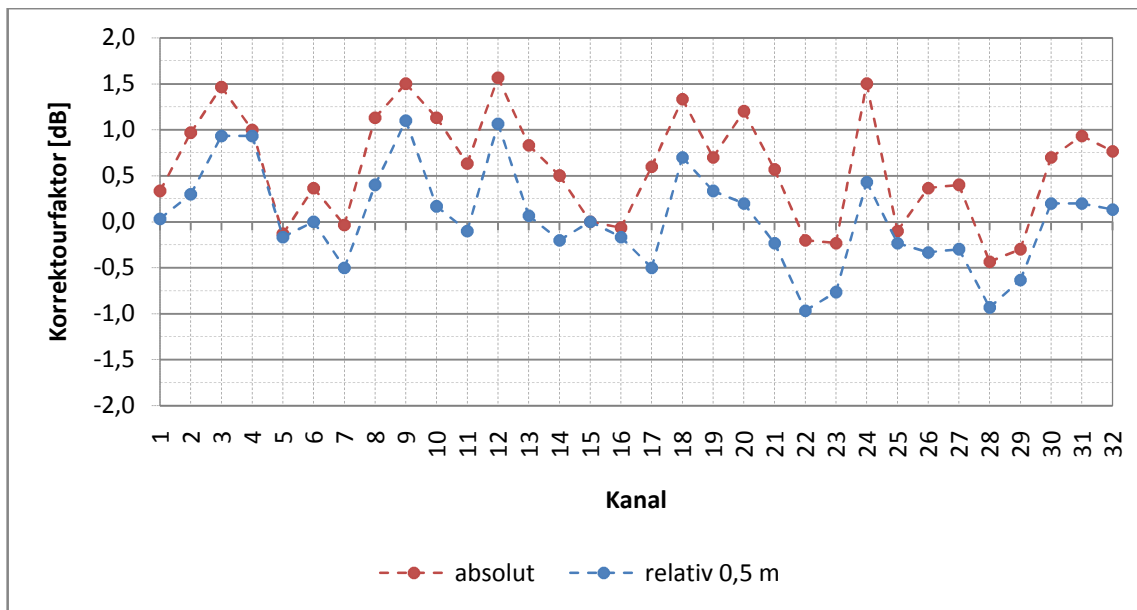


Abbildung 5.5: Korrekturfaktoren der einzelnen Kanäle bei Absolutkalibrierung und Relativkalibrierung

In den Voruntersuchungen wird weiter die in Abschnitt 4.1 beschriebene Pegelerhöhung auf Grund des Druckstaueffekts an Grenzflächen näher betrachtet. Die theoretische Pegelerhöhung, die sich ab der Grenzfrequenz f_g ergibt, siehe Gleichung (4.1), wird mit 6 dB angegeben. Für ein im Mittelpunkt des Grenzflächenarrays befindliches Mikrofon ergibt sich die theoretische Grenzfrequenz zu $f_g \approx 740$ Hz. Dies soll nun im Weiteren untersucht werden.

Dazu wird vor dem Array eine Punktschallquelle positioniert und an zwei Mikrofonen des Grenzflächenarrays das von ihr abgestrahlte weiße Rauschen spektral erfasst. Es wird ein Mikrofon des Innenkreises sowie ein Mikrofon des Außenkreises gewählt um den Einfluss der Position der Mikrofone in der Grenzfläche auf den Druckstaueffekt zu ermitteln. Anschließend werden zwei Messmikrofone an exakt den selben Positionen der gewählten Arraymikrofone aufgestellt und die beschriebene Messung wiederholt.

In Abbildung 5.6 ist der Pegelunterschied der Arraymikrofone zu den Messmikrofonen dargestellt. Die Schalldruckpegelunterschiede für das Arraymikrofon des Außenkreises sind blau, die des Innenkreises rot und die Schalldruckpegelunterschiede des gesamten Grenzflächenarrays grün dargestellt. Die Schalldruckpegelunterschiede des gesamten Arrays ergeben sich aus der Mittelung von Außen- und Innenkreis.

Eine signifikante Pegelanhebung ist oberhalb einer Terzmittenfrequenz von 1000 Hz zu erkennen. Die Maxima der Schalldruckpegeldifferenz zwischen Arraymikrofonen und Messmikrofonen im Terzband 160 Hz und 200 Hz können auf Einflüsse des Messraumes zurückgeführt werden (stehende Wellen). Für den Außenkreis ergibt sich im Mittel eine Pegelerhöhung für den Bereich von 1 bis 20 kHz von 4,6 dB und für den Innenkreis von

5,4 dB. Für das gesamte Grenzflächenarray ergibt sich somit oberhalb von 1000 Hz eine Schalldruckpegelerhöhung gegenüber offen konstruierten Arrays von 5,2 dB.

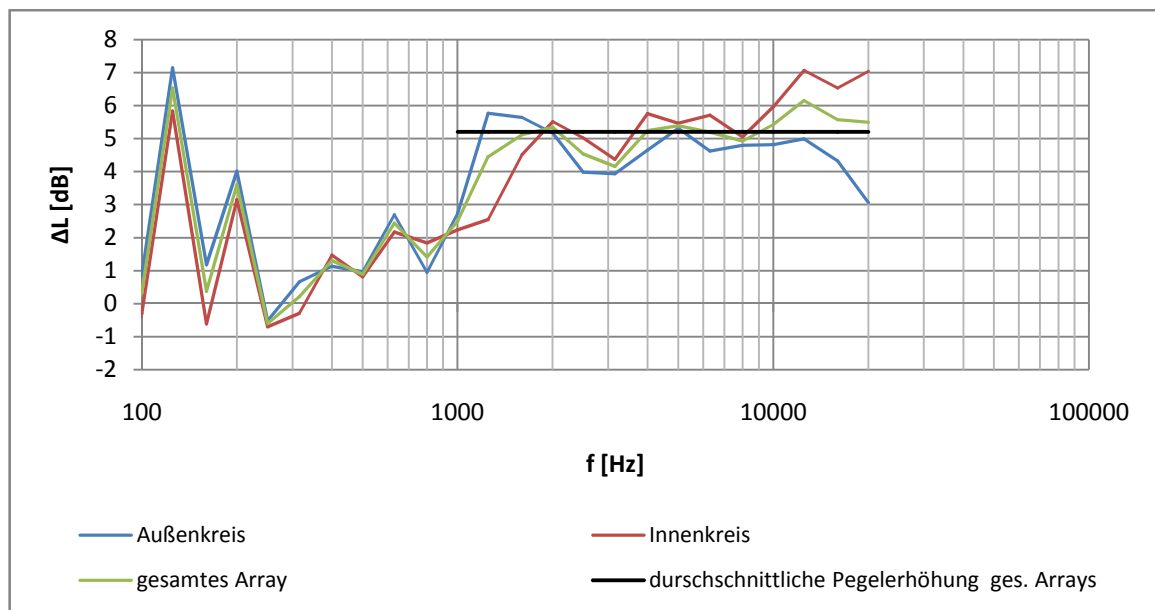


Abbildung 5.6: Pegeldifferenz für Mikrofone des Außen- und Innenkreises, sowie der Mittelwert für das gesamte Array in Folge des Druckstaueffektes

Für die Lokalisierung einer Schallquelle sowie deren relative Angabe von Schalldruckpegeln ist die Pegelerhöhung in Folge des Staudrucks unerheblich. Werden jedoch Angaben zu absoluten Schalldruckpegeln der Quellen gemacht, muss die Pegelerhöhung berücksichtigt werden.

Messung unter Laborbedingungen

Die praktische Erprobung zum Einfluss des rückwärtig einfallenden Schalls erfolgt im Labor, einem geschlossenen Raum. Dabei ist eine sich mit zunehmendem Störpegel verschlechternde Schallquellenlokalisierung zu erwarten.

Die in Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.11 dargestellten Ergebnisse der Schallquellenlokalisierung zeigen den am Array auftretenden Schalldruckpegel im Oktavband von 8 kHz.

Abbildung 5.7 zeigt das Ergebnis der Schallquellenlokalisierung der Luftdruckdüse ohne Störquelle. Abbildung 5.8 zeigt das Ergebnis der Quellenlokalisierung des Messobjektes mit Störquelle SQ1 bei einem Schalldruckpegel von $L_{p,SQ1} = 84$ dB (siehe Abbildung 5.9) und Abbildung 5.10 das Ergebnis der Quellenlokalisierung mit Störquelle SQ2 bei einem Schalldruckpegel von $L_{p,SQ2} = 89$ dB (siehe Abbildung 5.11).

Betrachtet man die Ergebnisse der Schallquellenlokalisierung, so ist eine verschlechterte Darstellung der Quelle mit zunehmendem Störpegel zu beobachten. Die Position der Quelle sowie ihr am Array erfasster Schalldruckpegel sind gleich. In der Darstellung der

gesamten Schallfeldsituation wird jedoch auf Grund des für alle Bilder gewählten Dynamikbereichs von 6 dB und des durch die Störquelle angehobenen diffusen Schalldruckpegels im Messraum der Kontrast der Darstellung reduziert.

Der von der Druckluftdüse abgestrahlte Schalldruckpegel wird in allen Messungen mit 76 dB erfasst. Der dabei von hinten auf das Grenzflächenarray einwirkende Schalldruck liegt bei den Messungen mit aktiver Störquelle bei 84 bzw. 89 dB und somit um 8 dB bzw. 13 dB über dem des Messobjektes. Die verschlechterte Schallquellenlokalisierung bei Störschall begründet sich durch den steigenden diffusen Schalldruckpegel im Raum, welcher durch den erhöhten Schalldruckpegel der Störquelle angehoben wird. Die Störquelle selbst wird auf Grund der halbkugelförmigen Richtcharakteristik der in der Grenzfläche eingebauten Mikrofone nicht erfasst.

Ein offen konstruiertes Array würde hier eine zusätzliche Quelle darstellen. Liegt der am Array erfasste Schalldruckpegel der Störquelle über dem des Messobjektes, wird die Störquelle als dominierende Quelle dargestellt.

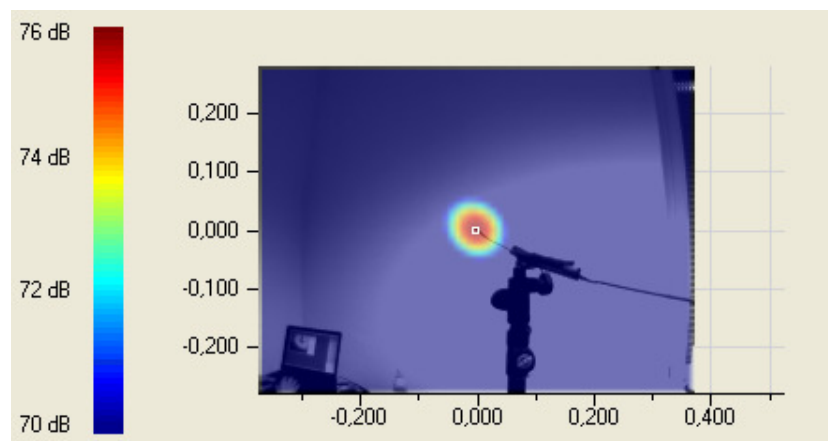


Abbildung 5.7: Luftdruckdüse ohne Störquelle (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)

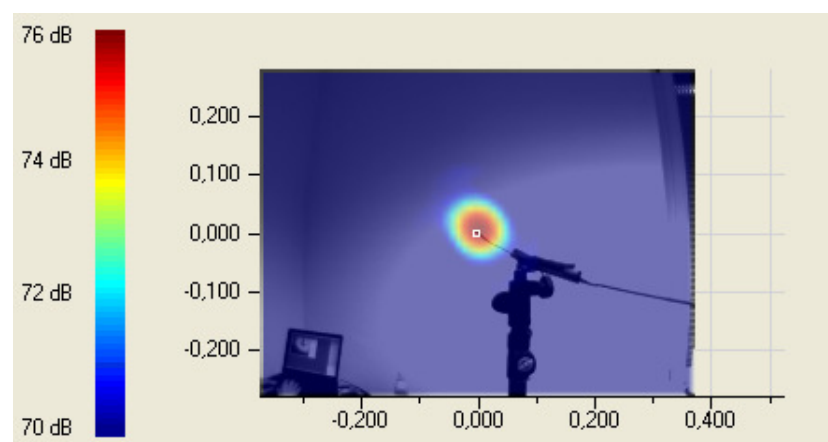


Abbildung 5.8: Luftdruckdüse mit Störquelle SQ1 (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)

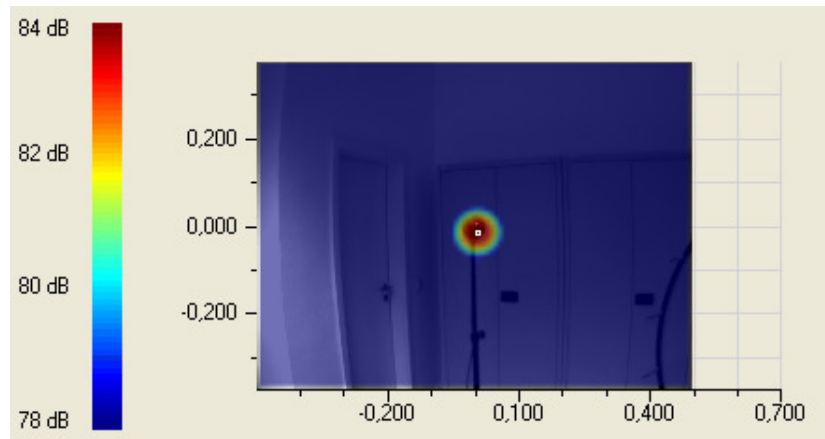


Abbildung 5.9: Störquelle SQ1, $L_{p,SQ1} = 84$ dB SPL (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)

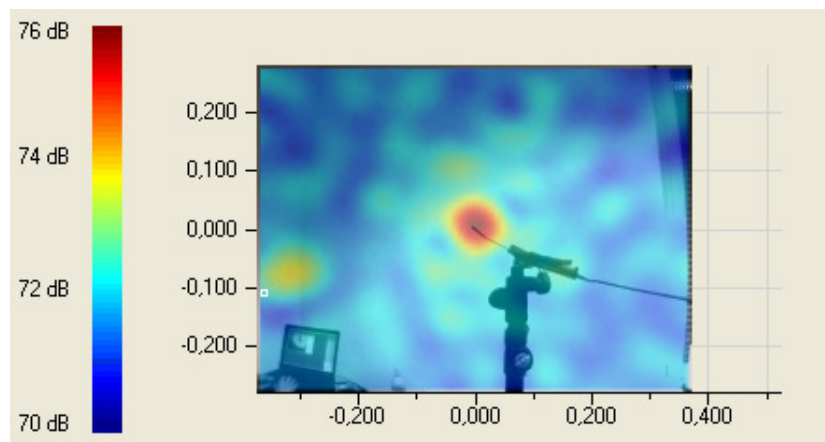


Abbildung 5.10: Luftdruckdüse mit Störquelle SQ2 (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)

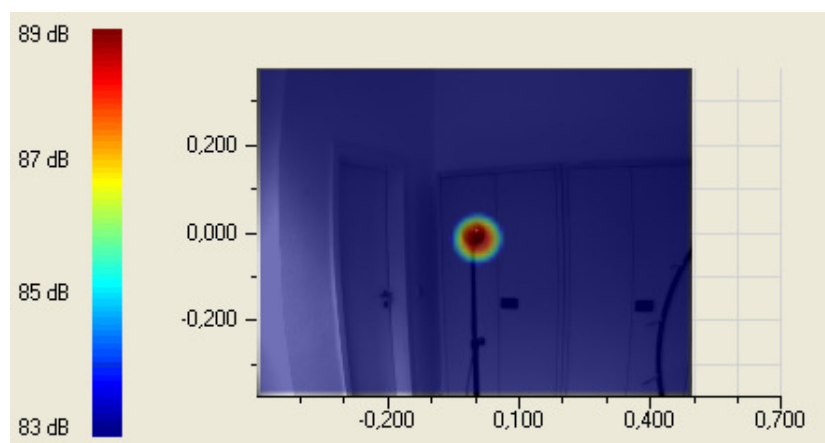


Abbildung 5.11: Störquelle SQ2, $L_{p,SQ2} = 89$ dB SPL (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)

Diese Untersuchung zeigt, dass bei Nutzung eines Grenzflächenarrays wirkungsvoll die Entstehung von nicht physisch existenten Schallquellen bei rückwärtigem Schalleinfall in der Analyseebene unterdrückt werden kann. Die Lokalisierung des Messobjektes kann allerdings nur erfolgen, solange der durch die Störquelle erzeugte diffuse Schalldruckpegel im Messraum unterhalb des am Array erfassten Schalldruckpegels des Messobjektes liegt.

Praktische Messung

Die Messung in praxisnaher Umgebung erfolgt, wie eingangs beschrieben, in einem Innenraum eines Kraftfahrzeugs. Als Messobjekt dient ein Schlüsselklappern, welches stellvertretend für Knarz- und Rüttelgeräusche untersucht wird. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht die Lokalisierbarkeit eines solchen Geräuschs in einem geschlossenen Fahrzeuginnenraum bei laufendem Motor und Lüftungsgeräuschen. Motor- und Lüftungsgeräusche sind niederfrequente Geräusche, wohingegen das Schlüsselklappern ein hochfrequentes Geräusch darstellt. Deshalb wird eine Störquelle verwendet, die den Innenraumpegel in dem Frequenzbereich der Auswertung erhöht. Die Lautstärke der Störquelle wurde so gewählt, dass für den Fahrer eine zum Schlüsselklappern subjektiv gleich laut empfundene Schallquelle entsteht. Das Schlüsselklappern wird durch manuelles impulsartiges Anstoßen des Schlüssels erzeugt. Je nach Intensität der Anregung ergibt sich zusätzlich ein Schlaggeräusch, das durch das Anschlagen des Schlüssels an die Verkleidung entsteht. Auf Grund dieser Eigenschaften ergibt sich eine nur näherungsweise reproduzierbare Schallsituation.

Das Grenzflächenarray wird während der Messung von einer Person, die auf dem Beifahrersitz Platz nimmt, gehalten. Der Abstand zwischen Messobjekt und Arraymittelpunkt beträgt 0,55 m. Die Messung erfolgt im ersten Schritt ohne Störquelle und im zweiten Schritt mit aktiver Störquelle. Die Ergebnisse der Lokalisierung der Messung ohne Störquelle ist in Abbildung 5.12 und für die Messung mit Störquelle in Abbildung 5.13 illustriert. Die Lokalisierung der Schallquelle ist in beiden Fällen gegeben. Die sich an der Position eines Arraymikrofons ergebenden Terzspektren sowie ihre Summenpegel sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Dabei ist der Terzpegel der Messung ohne Störquelle blau, der Terzpegel der Messung mit Störquelle rot gekennzeichnet.

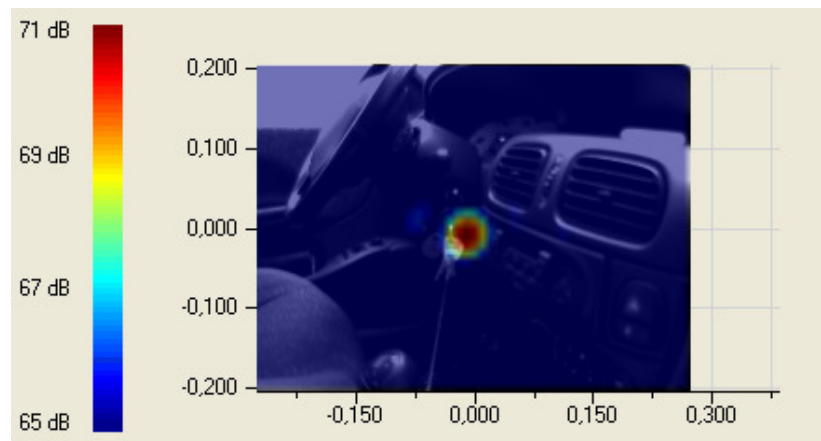


Abbildung 5.12: Ergebnis der Lokalisierung eines Schlüsselklapperns in einem geschlossenen Fahrzeuginnenraum bei laufendem Motor und laufender Lüftung (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)

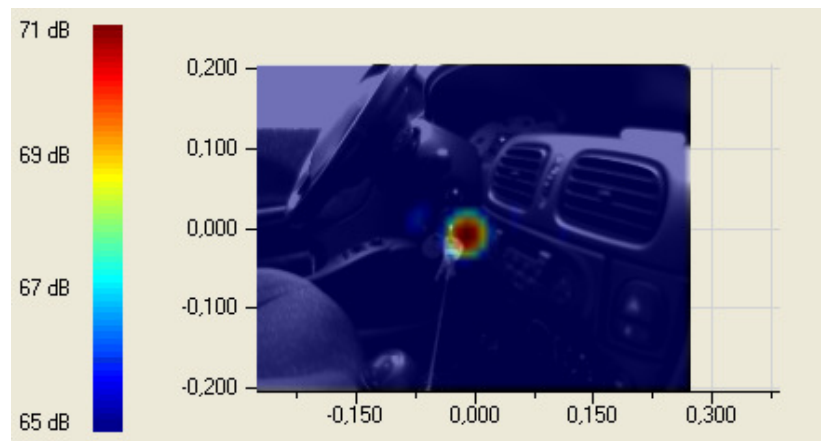


Abbildung 5.13: Ergebnis der Lokalisierung eines Schlüsselklapperns in einem geschlossenen Fahrzeuginnenraum bei laufendem Motor und laufender Lüftung sowie aktiver Störquelle (8 kHz Oktavband, Dynamikbereich 6 dB)

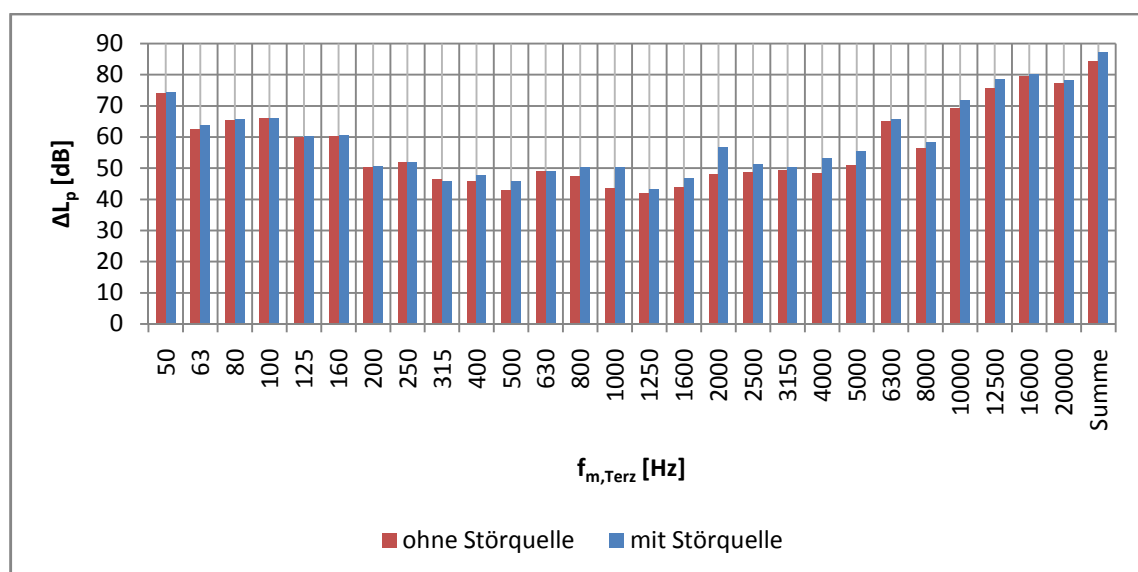


Abbildung 5.14: Terzpegel für ein Mikrophon im Grenzflächenarray ($L_{p, \text{Summe}, = 84,2 \text{ dB}}$, $L_{p, \text{Summe}, \text{mit Störquelle}} = 86,9 \text{ dB}$)

Simulation einer Quasiechtzeitmessung

Bei der Quasiechtzeitmessung wird die aktuelle Schallsituation an den Mikrofonen, über 1024 Einzelwerte bei einer Abtastfrequenz von 48 kHz, erfasst. Daraus ergibt sich für die Beurteilung der Schallsituation ein Zeitfenster von 21,3 ms. Die in diesem Zeitraum ermittelten Informationen werden der Signalverarbeitung zugeführt und im Anschluss dargestellt. Die Zeit, die die Signalverarbeitung benötigt um die erfassten Signale auszuwerten, wird von der Größe der Fokusebene und der verwendeten räumlichen Auflösung bestimmt. Nach der Darstellung der Ergebnisse beginnt eine neue Kurzzeitmessung. Schallquellen mit kontinuierlicher Abstrahlung können somit sehr gut im Vorfeld einer Messung detektiert bzw. ihr zeitliches Verhalten beobachtet werden. Die Ergebnisse der Quasiechtzeitmessung lassen sich jedoch nicht auf dem Personalcomputer speichern. Bei Schallquellen mit kurzen, impulsartigen Abstrahlungseigenschaften können jedoch Probleme bei der Lokalisation entstehen.

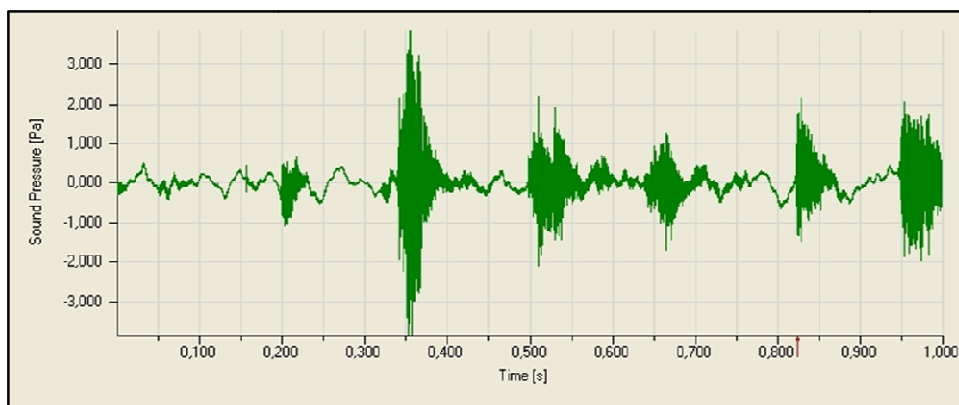


Abbildung 5.15: Zeit-Schalldruck-Signal des Schlüsselklapperns

Das Zeitsignal eines im Fahrzeuginnenraum klappernden Schlüssels ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Die einzelnen Schlagimpulse sowie deren zeitliche Struktur sind deutlich zu erkennen. Ein Schlüsselschlag dauert ca. 50 ms. Da der Erfassung der Schallsituation nur ein Zeitfenster von 21,3 ms zur Verfügung steht, sind die von ihr erfassten Informationen eines Schalldrucksignals stark vom Zeitpunkt seiner Messung abhängig. Erfolgt die Messung zeitgleich mit dem Beginn eines Schlagimpulses, ergibt sich ein Einzelbild in der Darstellung, welches in Abbildung 5.16 zu sehen ist.

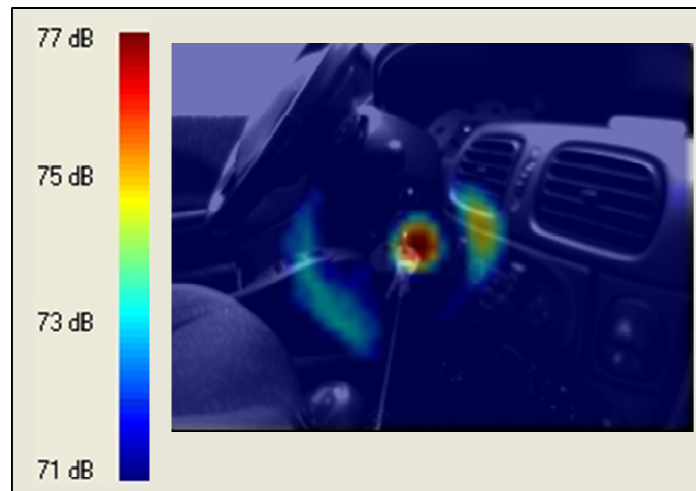


Abbildung 5.16: Einzelbild bei synchronem Start von Schlagimpuls und Schalldruckerfassung der Echtzeitanalyse (Zeitfensterlänge 21,3 ms, Oktavband 8 kHz, Dynamikbereich 6 dB)

Die Erfassung der Schallfeldsituation erfolgt nicht immer zu Beginn eines Schlagimpulses, sondern zu einem zufälligen Zeitpunkt. Auf Grund der zeitlichen Struktur impulsartiger Schallquellen ist deshalb nicht immer ein von ihr emittiertes Schalldrucksignal gegeben. Somit ergeben sich unter anderem Einzelbilder wie in Abbildung 5.17, das zu einem zufällig gewählten Zeitpunkt ermittelt wurde.

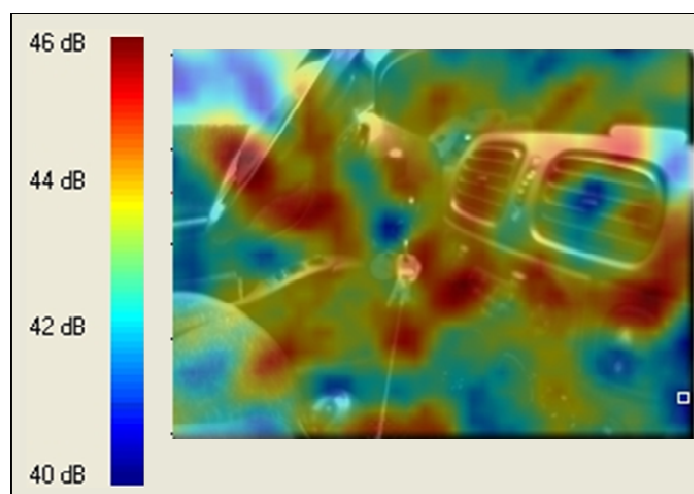


Abbildung 5.17: Einzelbild bei zufällig gewähltem Startzeitpunkt der Quasiechtzeitanalyse (Zeitfensterlänge 21,3 ms, Oktavband 8 kHz, Dynamikbereich 6dB)

Die Software AFD7001 bietet die Möglichkeit der Definition eines Mindesthintergrundpegels. Damit werden Schallfeldsituationen, die diesen Schwellenwert unterschreiten, nicht dargestellt. Definiert man den Mindesthintergrundpegel für das gezeigte Beispiel, einem Schlüsselklappen mit einem erwarteten Schalldruckpegel von 75 dB bis 80 dB (siehe Abbildung 5.16), mit 60 dB, so würde für das in Abbildung 5.17 gezeigte Einzelbild nur das optische Bild dargestellt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der schalltechnischen Untersuchung komplexer Objekte tritt häufig das Problem auf, dass herkömmliche Messungen mit einzelnen bzw. wenigen Mikrofonen nur unzureichende Ergebnisse beim Detektieren von Schallquellen liefern. Hier ermöglicht die Verwendung eines akustischen Kamerasystems Schallquellen innerhalb kürzester Zeit und mit geringem Aufwand exakt zu lokalisieren. Für die Anwendung im diffusen Schallfeld von Fahrzeuginnenräumen sind gebräuchliche Systeme auf Grund ihrer Größe und Konstruktion jedoch nicht geeignet.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde daher ein Prototyp eines handgehaltenen akustischen Kamerasystems entwickelt, welcher einen flexiblen Einsatz im Fahrzeuginnenraum ermöglicht.

Im ersten Schritt wurde die elektronische Konstruktion des Arrays entwickelt. Dabei wurde auf kostengünstige Elektretmikrofon-Kapseln zurückgegriffen und durch eine geeignete Beschaltung für den Betrieb an einer IEPE-Konstantstromquelle ausgelegt. Dies geschah über einen der Kapsel parallelgeschalteten Widerstand, über dessen Größe die Arbeitspunktspannung der Kapsel beeinflusst werden konnte. Im Weiteren wurden verschiedene Elektretmikrofon-Kapseltypen auf ihre Eigenschaften und der Einfluss des parallelgeschalteten Widerstand auf diese untersucht. Dafür wurden definierte Kriterien wie Frequenzgang, Klirrfaktor sowie Eigenrauschen messtechnisch erfasst und mit kommerziellen Messmikrofonen verglichen. Die am geeignetsten erscheinende Kombination aus Elektretkapsel und parallelgeschaltetem Widerstand wurde für den Prototypenbau ausgewählt. Die Wahl fiel auf die Elektretmikrofon-Kapsel Panasonic MW61A (K4), der ein Widerstand der Größe 2,2 k Ω vorgeschaltet wurde. Diese zeichnete sich durch einen besonders linearen Frequenzgang und ein niedriges Eigenrauschen aus.

Im Mittelpunkt des zweiten Schritts stand die mechanische Konstruktion, welche als Grenzflächenarray unter gewichtsoptimiertem Gesichtspunkt erfolgte. Dieser Zielstellung wurde durch die Verwendung leichter Materialien wie z.B. Aluminium und POM sowie einer geeigneten Konstruktion entsprochen. Desweiteren beinhaltet die Konstruktion des handgehaltenen Grenzflächenarray eine Stativhalterung für stationäre Anwendungen und den Entwurf eines Kameraadapters zur Aufnahme der Kamera des bestehenden akustischen Kamerasystems. Im Anschluss wurde das zusammengesetzte Grenzflächenarray an die Akquisitionshardware des bestehenden akustischen Kamerasystems AcoustiCam[®]

angeschlossen und unter praxisnahen Bedingungen erprobt. Im Vorfeld der praktischen Erprobung wurde die Ausprägung des Druckstaueffektes am Grenzflächenarray untersucht. Dieser beträgt oberhalb einer Terzmittenfrequenz von 1000 Hz für das konstruierte Grenzflächenarray 5,2 dB. In der Messung unter Laborbedingungen konnte weiterhin die starke Dämpfungseigenschaft des Grenzflächenarrays gegenüber Schallquellen im Rücken des Arrays nachgewiesen werden. Die praktische Messung erfolgte in einem geschlossenen Fahrzeuginnenraum. Die zu detektierende Schallquelle war ein Schlüsselklappen, welches bei laufendem Motor und laufender Lüftung sowie einer zusätzlichen Schallquelle eindeutig lokalisiert werden konnte.

Für weitere Entwicklungsschritte des Prototypen sollen im Folgenden Anregungen unterbreitet werden, die die Bedienung des Arrays komfortabler gestalten. Die Handhabbarkeit wird maßgeblich durch das Gesamtgewicht des akustischen Kamerasystems beeinflusst. An dieser Stelle ist zuerst über Optimierungsansätze nachzudenken. Um das Gewicht des Arrays entscheidend zu reduzieren, sollte die Konstruktion der Kameraaufnahme näher betrachtet werden. Diese bietet das größte Potenzial für die Gewichtsreduktion. An diesem Punkt wäre es ferner sinnvoll von der Verwendung der bisherigen Kamera abzugehen. Eine leichtere und kompaktere Kamera wäre der Gewichtsoptimierung zuträglich, dennoch sollte die Qualität der Bildsignale durch diese Veränderung nicht beeinträchtigt werden. Hierzu sollten am Markt befindliche Kameras auf ihre Eignung untersucht werden.

Ein weiterer Punkt ist ein zusätzlich in das Array integrierter Entfernungsmesser, dessen Anzeige auf der Rückplatte des Arrays angebracht werden sollte. Durch die Ausführung als Grenzflächenarray und der damit verbundenen eingeschränkten Sicht des Anwenders wäre so eine ständige Kontrolle des Abstandes zwischen Array und Messobjekt gewährleistet.

Es ist durchaus denkbar, dass mit fortschreitender technischer Entwicklung die Signalerfassung und -verarbeitung in ein und dem selben Messgerät untergebracht werden kann. Ein solches Messgerät wäre auf Grund seiner Unabhängigkeit von externer Hardware wesentlich flexibler im Einsatz in Fahrzeuginnenräumen und anderen ähnlichen Messsituationen.

7 Literaturverzeichnis

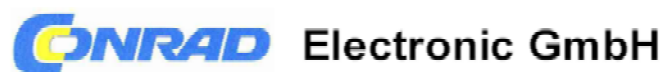
- [1] *Betriebsanleitung für das Kondensator Grenzflächenmikrofon GFM 132* URL: <http://www.neumann.com/?lang=de&id=current_microphones&cid=gfm132_publications>, verfügbar am 10.09.2008
- [2] Bloss, A.: *Fusion von Schall- und Bildinformationen* – Seminarskript – Erlangen: Mai 1998
- [3] Christensen, J.J.; Hald, J.: *Beamforming* –Technical Review No. 1-2004 – Nærum: Brüel & Kjær Sound and Vibration Measurement A/S, 2004
- [4] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.: *Akustische Wellen und Felder* – Berlin: März 2006
- [5] Dickreiter, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik – Band I* – 5. Auflage – München: Saur Verlag, 2008
- [6] Dickreiter, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik – Band II* – 5. Auflage – München: Saur Verlag, 2008
- [7] Dickreiter, M.: *Mikrofon-Aufnahmetechnik* – 3. Auflage – Stuttgart: Hirzel Verlag, 2003
- [8] DIN EN 61094 Teil 1 Anforderungen an Laboratoriums-Normalmikrofone
- [9] DIN EN 61094 Teil 2 Primärverfahren zur Druckkammerkalibrierung von Laboratoriums-Normalmikrofonen
- [10] DIN EN 61094 Teil 4 Anforderungen an Gebrauchs-Normalmikrofone
- [11] DIN EN 61094 Teil 5 Verfahren zur Druckkammer Kalibrierung von Gebrauchsnormal-Mikrofonen nach der Vergleichsmethode
- [12] DIN EN 61672 Teil 1 Schallpegelmesser: Anforderungen
- [13] Görne, T.: *Mikrofone in Theorie und Praxis* – 6. Auflage – Aachen: Elektor-Verlag, 2002
- [14] Görne, T.: *Tontechnik* – München: Fachbuch Verlag Leipzig, 2006
- [15] Hann, C.: *Experimentelle Analyse und Reduktion aeroakustischer Schallquellen an einfachen Modellstrukturen* – Erlangen: Universität Erlangen - Nürnberg, Dissertation, 2008
- [16] Heckl, M.; Müller, H. A.: *Taschenbuch der Technischen Akustik* – 2. Auflage – Berlin: Springer Verlag, 1994

-
- [17] Hesselman, N.: *Digitale Signalverarbeitung* – 2. Auflage – Würzburg: Vogel Buchverlag, 1989
- [18] Hummel, C.: *Vergleich akustischer Messketten für technische Geräusche* – Düsseldorf: Fachhochschule Düsseldorf, Diplomarbeit, 2004
- [19] Künzel, K.: *Vorlesung Technische Akustik I* – Mittweida: Hochschule für Technik und Wirtschaft, 2004
- [20] Künzel, K.: *Vorlesung Technische Akustik II* – Mittweida: Hochschule für Technik und Wirtschaft, 2004
- [21] Kuttruff, H.: *Akustik - Eine Einführung* – Stuttgart: Hirzel Verlag, 2004
- [22] Lenk, A., Pfeifer G., Werthschützky R.: *Elektromechanische Systeme* – Berlin: Springer Verlag, 2001
- [23] Möser, M.: *Technische Akustik* – 6. Auflage – Berlin: Springer-Verlag, 2005
- [24] Möser, M.; Müller G.: *Taschenbuch der Technischen Akustik* – 2. Auflage – Berlin: Springer Verlag, 2004
- [25] Müller, B.: *Ein neuer Typ von Grenzflächenmikrofonen* – Vortrag AES 1990
URL:<http://www.neumann.com/?lang=de&id=current_microphones&cid=gfm132_publications> , verfügbar am 10.09.2008
- [26] *Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer – Piezoelektronisches Prinzip - AN 2* – Applikationsschrift – Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul URL: <[http://www.mmf.de/PDF/AN2-Piezoelektrisches Prinzip.pdf](http://www.mmf.de/PDF/AN2-Piezoelektrisches_Prinzip.pdf)>, verfügbar am 08.09.2008
- [27] *Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer - IEPE Sensoren - AN 4* – Applikationsschrift – Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul URL: <<http://www.mmf.de/PDF/AN4-IEPE-Standard.pdf>>, verfügbar am 08.09.2008
- [28] *Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer – Messverstärker für Beschleunigungsaufnehmer - AN 6* – Applikationsschrift – Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul URL: <<http://www.mmf.de/PDF/AN6-Messverstaerker.pdf>>, verfügbar am 08.09.2008
- [29] Schnabel, P.: *Elektronik-Fibel* – 2.Auflage – Norderstedt: Books on Demand, 2003
- [30] Schulze,C.: *Anwendung eines Mikrofonarrays zur Ortung von Schallquellen* – Dresden: Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2004
- [31] Sessler, G.M.: *Electrets* – Berlin: Springer-Verlag, 1980

Anhang

Anhang A: Datenblätter der verwendeten Elektretmikrofon-Kapseln

K1 – Conrad EMY -63M/P



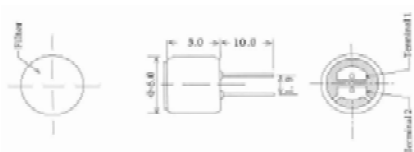
EMY-63M/P (Artikel-Nr. 335412-07)

EKULIT

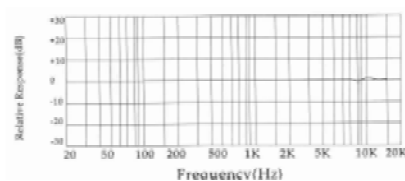
SPECIFICATIONS:

TYPE	UNIT	EMY-63M/P
Sensitivity (0dB=1V/Pa. 1kHz)	dB	-38±3
Directivity		Omnidirectional
Impedance		Low impedance
Current consumption	mA	Max. 0.5
Standard operating voltage	V	1.5-10 (2.0)
Sensitivity reduction		within -3dB at 1.5V
S/N ratio	dB	more than 60
Current at 1kHz, 0dB=1V/μbar	mA	0.25
Operating Temperature	°C	-10~+45
Storage Temperature	°C	-20~+60

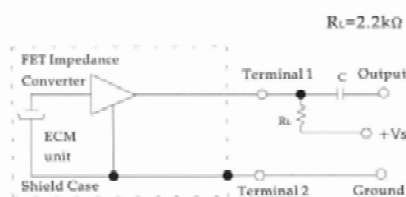
Dimensions :
(Unit: mm)



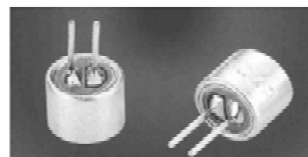
Typical Frequency response curve:



Schematic diagram :



Picture :



Adresse: Klaus-Conrad-Str. 1 • 92240 Hirschau

Tel: +49-9604/40 89 88 • Fax: +49-9604/40 89 36

E-mail: businessbetreuung@conrad.de Web site: www.CONRAD.de

K2 – AU 20 (Mikrofonkapsel aus Mikrofon-Verstärker-Einheit)

Für diese Elektretmikrofon-Kapsel existiert kein Datenblatt. Sie wurde aus einer vorgefertigten Mikrofon-Verstärker-Einheit entnommen. Der Hersteller dieses Produktes ist die Firma HANSE Electronics Co., Ltd. Ihre Produkte werden unter anderem durch die Firma ELV vertrieben.

Mikrofon-/Vorverstärker-Set AU 20

Artikel- Nr.: 64616

Bedienungsanleitung

Stand 03-2006

Beschreibung:

Extrem schlanker Verstärkerbaustein mit Elektret-Mikrofon, ideal für den Einbau in eine schlanke Hülse. Das bereits einsatzfertig bestückte Set ist der Problemlöser für alle Fälle, wo man ein Mikrofon einsetzen muss – ob an der Videoüberwachungskamera, der Tür-Wechselsprechanlage, in selbst gebauten Audiogeräten, Lichtorgeln u. v. a. m.

Sicherheitshinweise:

- Bei Sach- oder Personenschäden, die durch unsachgemäße Handhabung oder Nichtbeachten dieser Bedienungsanleitung verursacht werden, übernehmen wir keine Haftung! In solchen Fällen erlischt jeder Garantieanspruch.
- Zur Reinigung keine lösemittelhaltigen Reinigungsmittel verwenden. Darauf achten, dass keine Feuchtigkeit in das Geräteinnere gelangt.
- Das Gerät ist kein Spielzeug. Es darf nicht im Zugriffsbereich von Kindern aufbewahrt oder betrieben werden.
- Beachten Sie bitte die korrekte Polarität der Betriebsspannung.

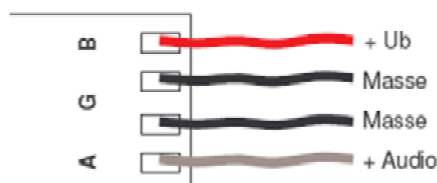
Bei Zweifel über die Arbeitsweise, die Sicherheit oder den Anschluss des Gerätes eine Fachkraft oder unseren Technischen Kundendienst kontaktieren:

ELV Elektronik AG - Technischer Kundendienst
Postfach 1000 26787 Leer
Tel: 0491/6008-245 (-246: Rückrufservice)
E-Mail: technik@elv.de

Technische Daten:

Versorgungsspannung:	7V – 12V (+/- 2V) DC
Stromaufnahme:	30mA
Ausgangsimpedanz:	600 Ohm
Abm.:	35 x 6mm
Gewicht:	2g

Anschlussbelegung:



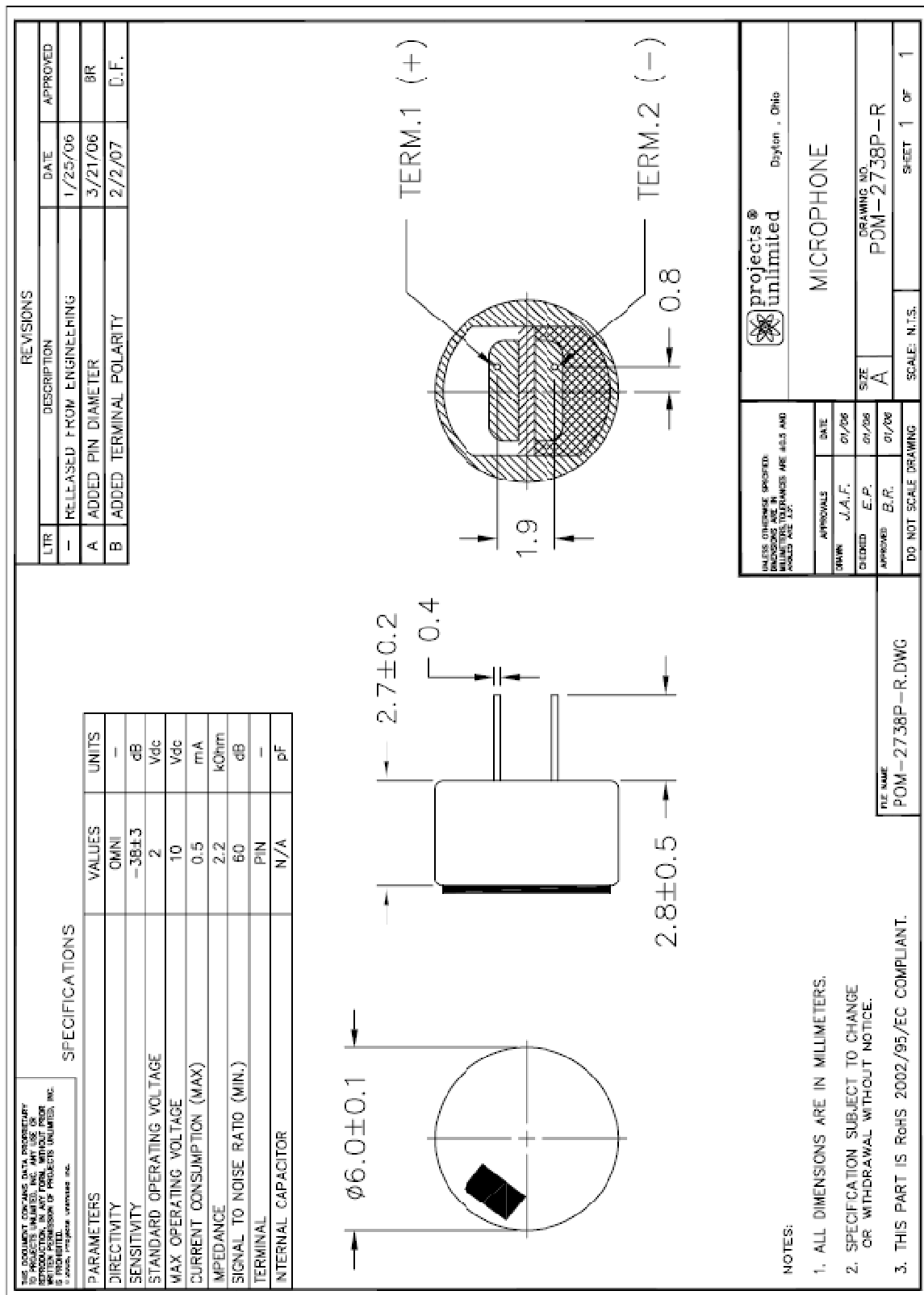
Gerät nicht im Hausmüll entsorgen!
Elektronische Geräte sind entsprechend der Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte über die örtlichen Sammelstellen für Elektronik-Altgeräte zu entsorgen!



Kontakt
ELV Elektronik AG
26787 Leer
Tel: 0491/600888
www.elv.de



K3 – project unlimited POM-2738P-R



K4 – Panasonic MW61A

Panasonic

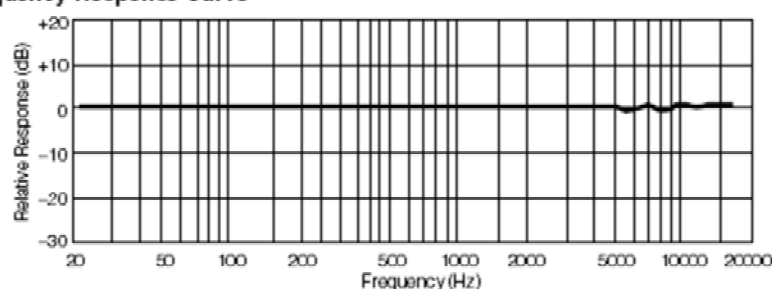
Microphone Cartridges

**Omnidirectional Back Electret
Condenser Microphone Cartridge**Series: **WM-61A**
WM-61B (pin type)■ **Features**

- Small microphones for general use
- Back electret type designed for high resistance to vibrations, high signal-to-noise ratio
- High sensitivity type
- Microphone with pins for flexible PCB (WM-61B type)

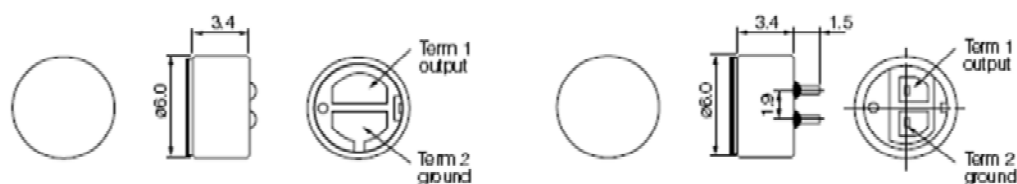
■ **Sensitivity**
 $V_s = 2.0V$
 $R_L = 2.2k\Omega$
 $-35 \pm 4dB$ ■ **Specifications**

Sensitivity	$-35 \pm 4dB$ (0db = 1V/pa, 1kHz)
Impedance	Less than 2.2 k Ω
Directivity	Omnidirectional
Frequency	20–20,000 Hz
Max. operation voltage	10V
Standard operation voltage	2V
Current consumption	Max. 0.5 mA
Sensitivity reduction	Within -3 dB at 1.5V
S/N ratio	More than 62 dB

■ **Typical Frequency Response Curve**■ **Dimensions in mm (not to scale)**

WM-61A

WM-61B



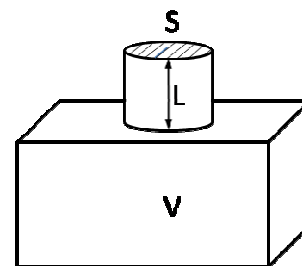
Design and specifications are subject to change without notice. Ask factory for technical specifications before purchase and/or use.
 Whenever a doubt about safety arises from this product, please contact us immediately for technical consultation.

Anhang B: Resonanzfrequenz und technische Zeichnung der Druckkammer

Resonanzfrequenz

Die Druckkammer, mit deren Hilfe der Frequenzgang der Mikrofonkapseln untersucht wird, ist unter akustischen Gesichtspunkten gesehen ein Helmholtz-Resonator. Dieser besitzt eine Resonanzfrequenz, die sich über

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}}$$



bestimmen lässt.

Mit S der Halsquerschnittsfläche, V dem eingeschlossenen Luftvolumen und L der Halslänge des Resonators.

Aus der Konstruktionszeichnung der Druckkammer ergibt sich für

- die Elektretkapsel

$$S = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$L = 0,001 \text{ m}$$

$$V = 1,70 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

eine Resonanzfrequenz von

$$f_r \approx 19,200 \text{ Hz}$$

- das Messmikrofon

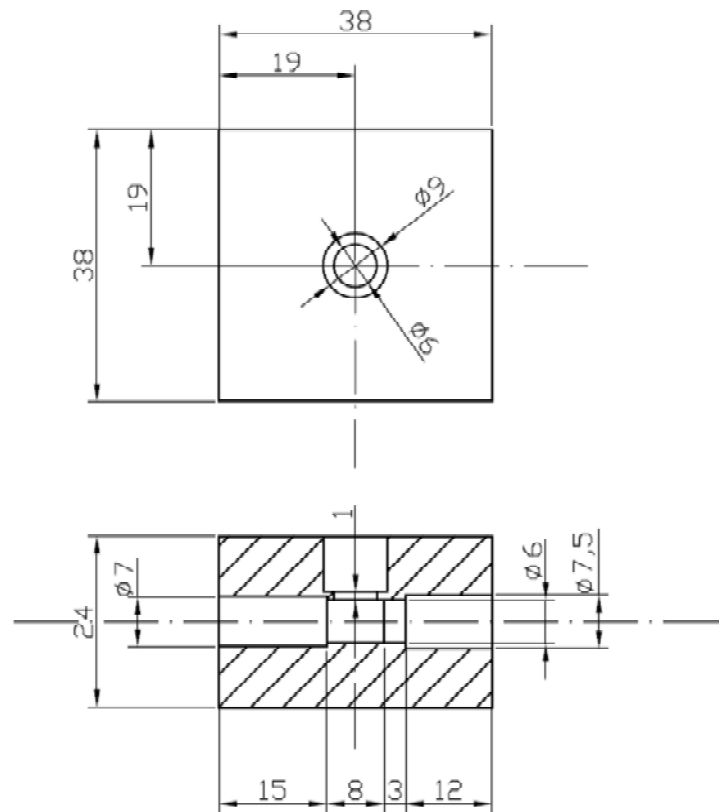
$$S = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$L = 0,001 \text{ m}$$

$$V = 3,68 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$$

eine Resonanzfrequenz von

$$f_r \approx 14500 \text{ Hz}$$

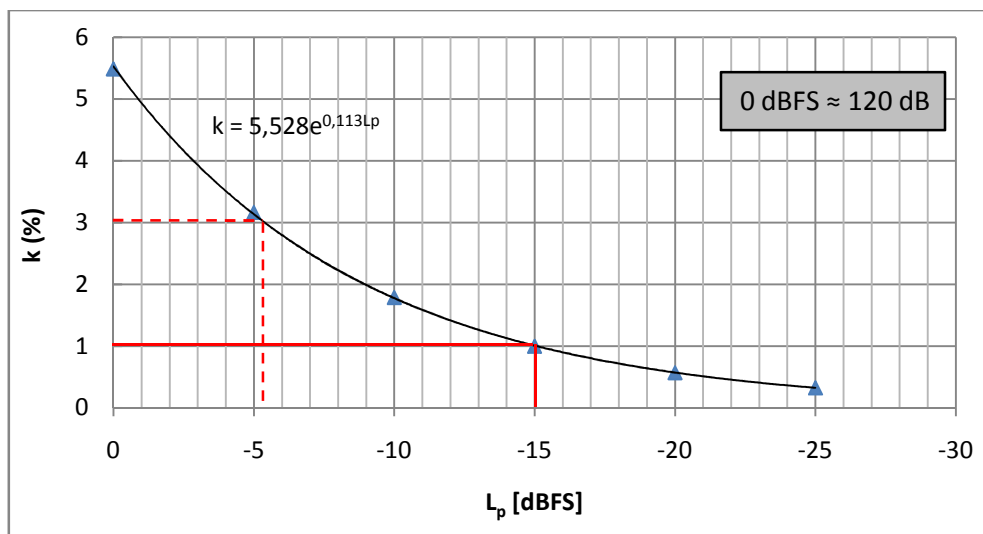


(Verwendungsbereich)				(Zul. Abw.)		(Oberfl.)	Maßstab 1 : 1	(Gewicht)
							(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)	AlMg1
				Bearb.	Datum	Name	Druckkammer	
				Gepr.	28.08.2008	Schröter		
				Norm				
								Blatt 1
								Blätter
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:			Ersatz durch:

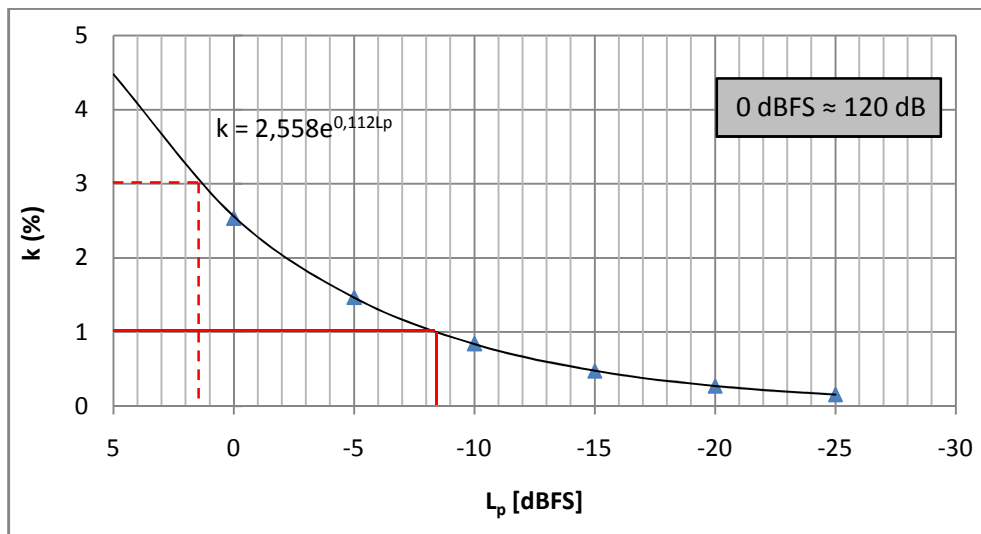
Anhang C: Bestimmung des Klirrfaktors und des maximalen Schalldruckpegels

Die Klirrfaktorbestimmung erfolgt bei $f = 1000\text{Hz}$.

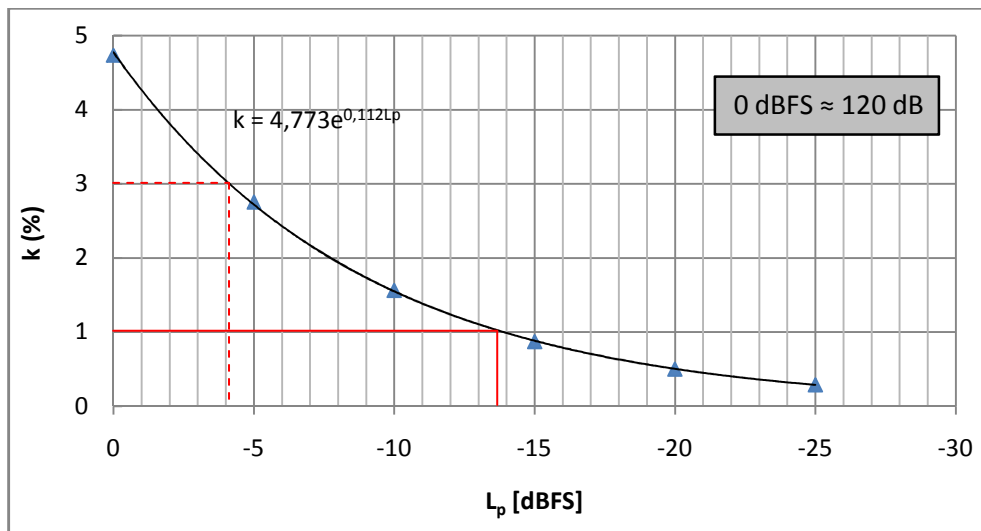
K1 – EMY-63M/P



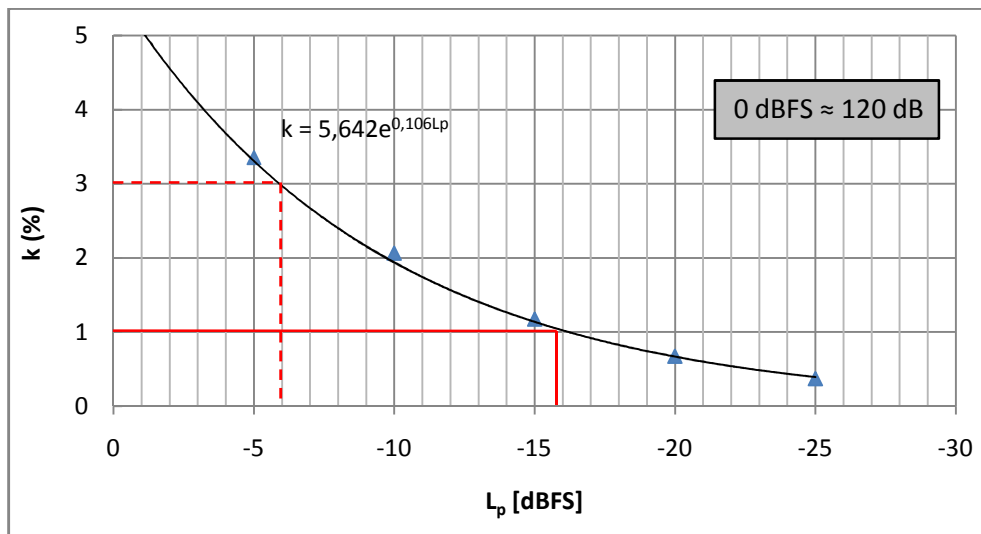
k [%]	L_p [dBFS]	Maximaler Schalldruckpegel
		[dB]
3	-5,4	114,6
1	-15,1	104,9

K2 – AU 20

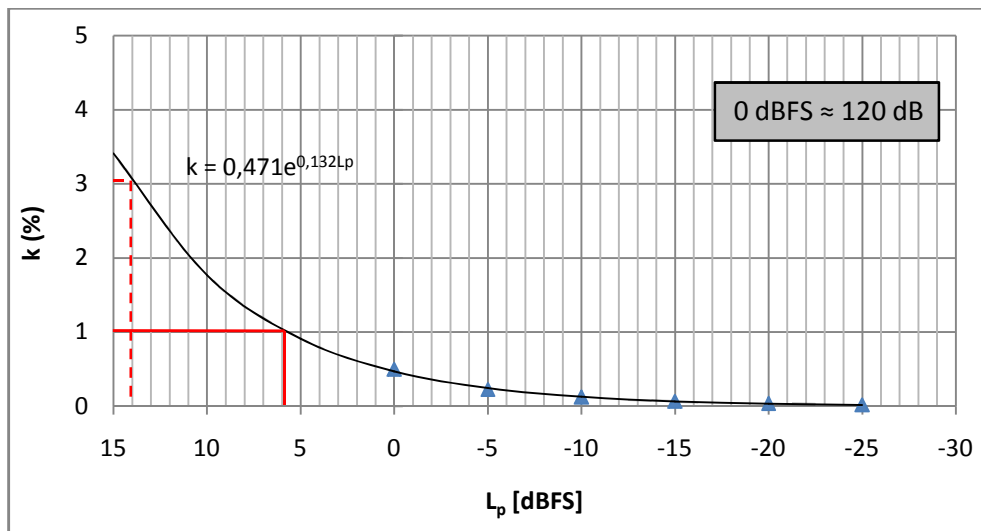
k [%]	Maximaler Schalldruckpegel	
	L_p [dBFS]	[dB]
3	1,4	121,4
1	-8,4	111,6

K3 – POM-2738P-R

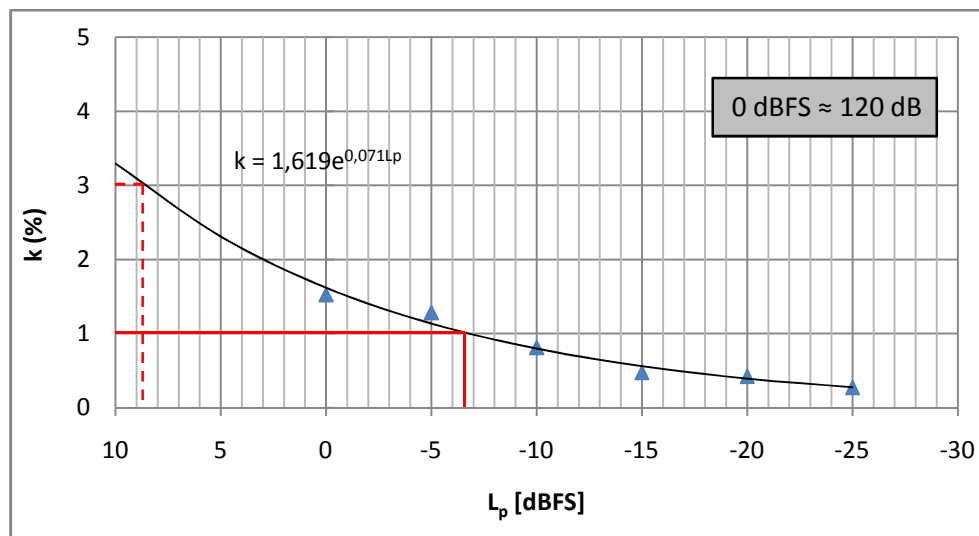
k [%]	Maximaler Schalldruckpegel	
	L_p [dBFS]	[dB]
3	-4,1	115,9
1	-14,0	106,0

K4 – MW61A

k [%]	L_p [dBFS]	Maximaler Schalldruckpegel [dB]
3	-6,0	114,0
1	-16,3	103,7

Microtech Gefell M360

k [%]	L_p [dBFS]	Maximaler Schalldruckpegel [dB]
3	14,0	134,0
1	5,7	125,7

BSWA-Tech MPA416

k [%]	Maximaler Schalldruckpegel	
	L_p [dBFS]	[dB SPL]
3	8,7	128,7
1	-6,8	113,2

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Dresden, den 06.02.2009